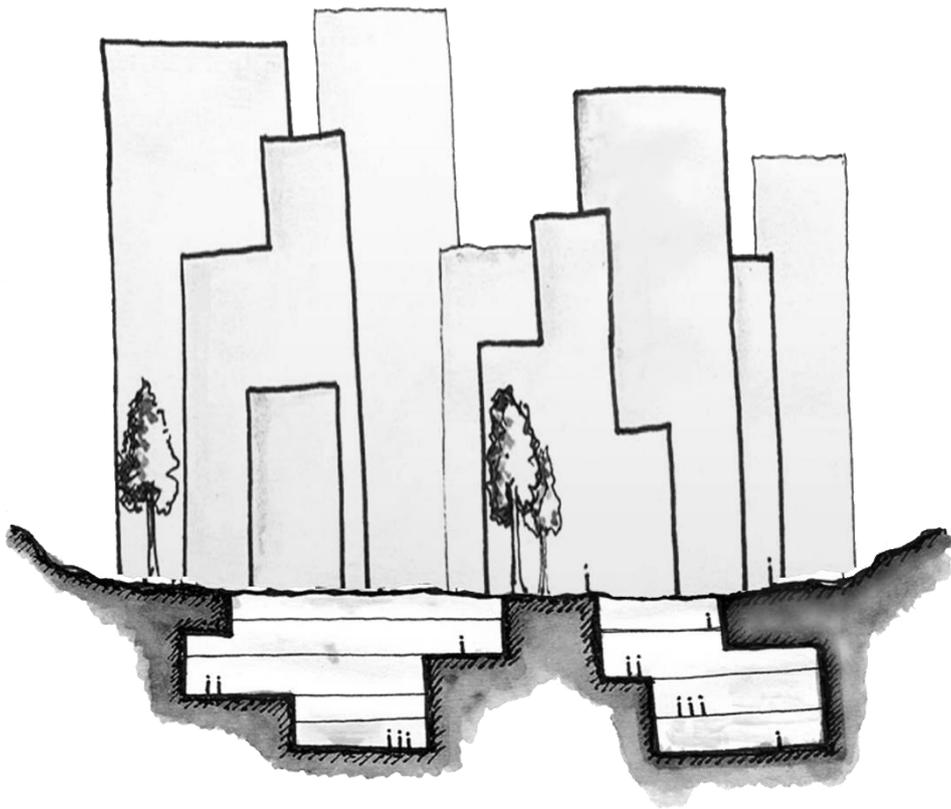


Xiao Min Zhou Yang



Arquitectura subterránea: Viabilidad y construcción

Tutor: Manuel Rodríguez Pérez

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Arquitectura subterránea: Viabilidad y construcción

Alumna:

Xiao Min Zhou Yang

Tutor:

Manuel Rodríguez Pérez

Departamento de construcción y tecnologías arquitectónicas.

Aula TFG 2:

Coordinadora: Gema Ramírez Pacheco

Adjunto: David Mencías Carrizosa

Fecha:

Junio 2021

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

*"Tú que pasas por aquí
a ti te ruego
que hagas algo
que aprendas un paso de baile
algo que te dé el derecho
de estar vestido con tu piel y tu vello
aprende a caminar y a reír
porque no tendría sentido
a la postre
porque son muchos los que han muerto
mientras tú sigues vivo
y no haces nada con tu vida".*

Charlotte Delbo.

Resumen

El mundo se está enfrentando a las consecuencias de una descontrolada y acelerada urbanización, a la par de un crecimiento demográfico exponencial. De esta realidad derivan problemas relacionados con la congestión en el tráfico, degradación de las condiciones medioambientales por la contaminación del agua y el aire, y otras catástrofes relacionadas con los desastres naturales tales como inundaciones o heladas. A causa del incremento de la densificación en las ciudades y la potencial escasez de la superficie urbanizable disponible, se deben proponer nuevas construcciones que puedan dar respuesta a los nuevos problemas planteados. Una posible solución es el uso de arquitectura subterránea dado que se ve menos afectada por las temperaturas extremas, resisten mejor a catástrofes naturales, y supondrían una descongestión de las calles en la superficie.

Este trabajo pretende analizar las oportunidades que ofrece la arquitectura subterránea para liberar el espacio urbano y el tipo de construcción a desarrollar para conseguir unas condiciones habitables, seguras y confortables. Para ello, se determinan factores de entorno relativos al clima, terreno, topografía, o materialidad que favorezcan este tipo de construcciones. Se genera un catálogo de ejemplos de arquitectura subterránea con distintos usos para su aplicación futura como modelo.

Palabras clave: arquitectura subterránea, futuro, habitabilidad, viabilidad, sostenibilidad.

Abstract

The world is facing the consequences of an uncontrolled and accelerated urbanization, as well as an exponential demographic growth. As a result of this reality, various problems emerge, such problems as traffic congestion, environmental degradation caused by water and air pollution, and other natural disasters as floods or frost. Due to the fact that cities are becoming denser, and eventually the land capacity will be scarce. As a society, we must offer new solutions to solve these forthcoming problems. There is an opportunity in the earth sheltered architecture, since it is less vulnerable to external variations and extreme temperatures, as well as withstand natural disasters in a better way than superficial architecture. Also, earth sheltered architecture will decongest superficial roads, becoming a safer city for pedestrians.

This paperwork intends to analyse the opportunities that this kind of architecture has to offer in order to liberate the urban space, and how to make underground constructions feasible, habitable and comfortable. For this purpose, environmental factors related to climate, soil, topography and construction materials are determined. This work includes a catalogue of examples of earth sheltered architecture with different uses for a future implementation as a model.

Key words: earth sheltered architecture, future, habitability, feasibility, sustainability.

ÍNDICE

1.	Introducción	10
1.1.	Motivación	11
1.2.	Objetivos	11
1.3.	Estructura y metodología	12
1.4.	Ámbito de estudio	13
2.	Arquitectura subterránea: Estado de la cuestión	15
2.1.	Introducción	15
2.2.	Evolución de la arquitectura subterránea	16
2.3.	Aspectos generales de las construcciones subterráneas	18
2.4.	Recursos energéticos renovables del subsuelo	24
2.5.	Ejemplos de interés	24
3.	Casos de estudio	31
3.1.	Justificación de casos	31
3.2.	<i>Casa Rasca infernos</i> , Fernando Higuera	32
3.3.	Galerías subterráneas <i>Crysta Nagahori</i> en Osaka	34
3.4.	Ciudad subterránea de Montreal	36
4.	Comparativa de casos	41
4.1.	Ubicación	41
4.2.	Dimensiones	41
4.3.	Construcción	41
4.4.	Uso	41
4.5.	Resumen de comparativa de datos	41
5.	Casos fallidos de arquitectura subterránea	45
5.1.	Ciudad subterránea de Pekín	45
5.2.	Estación de Aldwich, Londres	46
5.3.	Estación de Chamberí, Madrid	46
5.4.	Búnker del gobierno, Bonn, Alemania	46
5.5.	Ciudad subterránea de Seattle	47
6.	Viabilidad en el futuro	49
7.	Conclusiones y futuras líneas de investigación	53
8.	Bibliografía	57
9.	Índice de figuras	61

1. Introducción



Figura 1: Casa Plan B, Sergey Makhno Architects

El presente trabajo es una continuación del estudio sobre arquitectura subterránea iniciado durante el curso 2020-2021 en la asignatura de Intensificación en Construcción y Tecnologías Arquitectónicas. El estudio pretendía establecer unas nociones básicas sobre este tipo de construcciones, estableciendo ventajas y desventajas, vistas a un posible futuro, e interrelaciones con otras áreas de estudio tales como la sociología o geografía.

La ausencia de luz natural, o de ventilación producen consecuencias dañinas tanto para la arquitectura como para el ser humano. Son numerosos los informes que demuestran la gran necesidad que tenemos de espacios al aire libre y al sol. Entonces, ¿cómo diseñar y construir arquitectura subterránea habitable y funcional?

Este trabajo no busca dar solución a esta pregunta, pues son muchos los edificios y construcciones que están actualmente bajo tierra, en pleno funcionamiento y correctamente diseñados. Sin embargo, no parece obvio saber cómo se han construido, las razones que han impulsado este tipo de arquitectura, cómo han salvado los problemas surgidos a lo largo del diseño y la ejecución.



Figura 2: Rainier Square Tower, Seattle

A pesar de las dificultades previamente mencionadas, la arquitectura subterránea sí tiene numerosas ventajas. Si nos situamos en una ciudad con grandes rascacielos tales como Nueva York o Chicago, la sensación que genera es de escala desproporcionada, asimilable a las primeras construcciones que alejaban al ser humano de la arquitectura y se erigía a los Dioses. Esta sensación genera una percepción errónea del espacio, provocando una desorientación dado que no se puede ver *más allá*. La arquitectura subterránea, sin embargo, es más discreta con el impacto visual, permite una percepción global del entorno próximo.

Asimismo, el terreno posee una gran capacidad de aislamiento tanto térmico como acústico. El aislamiento térmico va estrechamente ligado con el hecho de que el edificio está menos expuesto a la intemperie y a agresivos agentes externos tales como el viento o la lluvia. Numerosos estudios han dictaminado que la contaminación acústica es uno de los mayores problemas del siglo XX y XXI, sobre todo en las grandes ciudades superpobladas. Un buen aislamiento acústico del ruido produce una mejoría en el diseño del edificio y un incremento de la calidad de vida.



Figura 3: Restaurante 5.8 UNDERSEA, Islas Maldivas

Por tanto, el terreno tiene un gran potencial como protección frente a agentes externos, catástrofes naturales, temperaturas extremas, así como descongestión de zonas urbanas saturadas.

1.1. Motivación

Las ciudades subterráneas han sido siempre un atractivo misterio para mí desde que las descubrí en 2017 a través de Singapur, un país-ciudad que posee grandes limitaciones de espacio urbanizable debido a su escasa superficie. Su solución, tras agotar la superficie disponible construyendo rascacielos en altura, fue diseñar ciudades que crecieran de manera inversa: por debajo de la cota de suelo. A raíz de este interés, fui descubriendo las peculiaridades de una ciudad en la que existen dos cotas de calle y organizan el espacio urbanístico de manera muy eficiente.



Figura 4: Construcción subterránea MTR en Singapur

La arquitectura subterránea ha sido objeto de estudio a lo largo del tiempo. Con motivo de un superficial trabajo que realicé en este ámbito realizado en 2020, pude concretar una lista de ventajas y desventajas que suponían este tipo de construcciones. En primer lugar, se establecen el menor impacto visual, la mayor protección frente a agentes externos, el menor mantenimiento de fachadas exteriores y un mayor aislamiento acústico y térmico como factores positivos; y el coste de la construcción y el problema de la ventilación, siendo la humedad la consecuencia, como factores negativos.

Por todo ello, nace mi interés por investigar cómo se construye la arquitectura subterránea salvando los problemas previamente mencionados a través del diseño y la innovación.

1.2. Objetivos

Este trabajo pretende determinar bajo qué condiciones es viable construir bajo rasante, es decir, cuáles serían las condiciones de entorno necesarias con vistas a un uso futuro de este tipo de arquitectura. Para conseguir este objetivo principal, se estudian

diferentes aspectos que condicionan estas construcciones como son el clima, la profundidad, la maquinaria, el terreno, la topografía y los materiales. Además, concretar qué usos pueden ocupar ese espacio, si existe algún orden o jerarquía mejor que otro o, sin embargo, no es significativo una ordenación de usos. Argumentar por qué en algunas zonas del mundo sí han empezado a construir bajo tierra y en otras es aún impensable. Establecer un recopilatorio ejemplos de arquitectura subterránea a diferentes escalas y con distintos usos para servir como referente en construcciones enterradas posteriores.

1.3. Estructura y metodología

El método a seguir se descompone en tres bloques:

En el primer bloque, definir el estado de la cuestión, es decir, recopilar la información existente sobre arquitectura subterránea. En primer lugar, estudiar los diferentes tipos de arquitectura subterránea surgida a lo largo del tiempo y su relación con el terreno que los soporta. En segundo lugar, dar una visión general de la misma respecto al tipo de clima, terreno y topografía, y su estrecha relación con la construcción de este tipo de arquitectura. Incluir, además, el factor de profundidad ligado estrechamente con la maquinaria disponible, determinando cuál es la mayor profundidad excavada por el hombre y los usos que ese espacio alberga. Definir, también, los agentes contaminantes en el subsuelo que pueden limitar la excavación o incluso imposibilitar la construcción.

En el segundo bloque, tras el estudio de varios ejemplos en el bloque anterior, se deciden elegir tres casos de estudio exitosos debido a sus características formales y constructivas. En ellas, se investigan los aspectos definidos de forma genérica en el primer bloque para el diseño de este tipo de arquitectura a tres escalas diferentes: edificio, infraestructura y ciudad. En este bloque, además, se incluye un listado de ejemplos de arquitectura subterránea que no se ha integrado correctamente en el urbanismo, es decir, ejemplos fallidos.

En el tercer y último bloque, se presentan posibles amenazas o problemas en el futuro en donde este tipo de construcciones podrían ser una solución viable.

Para llevar a cabo este trabajo se realizará un análisis de la historia de la arquitectura subterránea, focalizando en las áreas que más se van a profundizar posteriormente en los casos de estudio. Para determinar las conclusiones extraídas del trabajo, se realizará una tabla resumen en donde se exponen las características en las que más se ha focalizado.

1.4. Ámbito de estudio

Para llevar a cabo la investigación se han establecido unos límites para poder abarcar el estudio de la arquitectura subterránea a diferentes escalas y en distintos lugares del mundo.

El presente trabajo comienza proporcionando una visión general de la arquitectura subterránea en el mundo, presentando ejemplos de construcciones bajo tierra dignas de mención por su materialidad, iluminación, ubicación o estructura. Sin embargo, para realizar el trabajo se eligen tres casos de estudio contemporáneos definidos dado que se pretende formalizar una construcción con vías futuras. Cada una de estas tres construcciones representa un ejemplo exitoso de arquitectura subterránea a diferente escala, dando lugar a tres soluciones arquitectónicas diferentes, aplicables hoy en día o en el futuro próximo.

Además, el motivo de su construcción también es diferente siendo, respectivamente, la construcción de una vivienda de uso privado, el aprovechamiento de lugares subterráneos para su interconexión, y el resguardo contra el frío.

Los tres casos a estudiar son:

- El Rascañiernos, Fernando Higuera. Madrid, España.
- *Crysta Nagahori*. Osaka, Japón.
- *Ciudad subterránea de Montreal*. Montreal, Canadá.



Figura 5: Mapa de localizaciones de los ámbitos de estudio. Elaboración propia

2. Arquitectura subterránea: Estado de la cuestión

2.1. Introducción

El ser humano ha buscado, desde sus primeras pisadas en el mundo, un refugio. Este hábito, heredado de los animales, cubre una de las necesidades básicas de los mismos: resguardarse del frío, del calor, del viento, de un peligro inminente... Esta lógica encierra un innatismo en su interior: la búsqueda de un vacío dentro de la tierra sea en hoyos o en cuevas. El vacío simboliza un espacio habitable, capaz de albergar durante un tiempo corto o prolongado a un ser humano o animal. Estos refugios primitivos se basaban en la idea de ser una cavidad con una salida, por donde entraba la luz y se ventilaba.

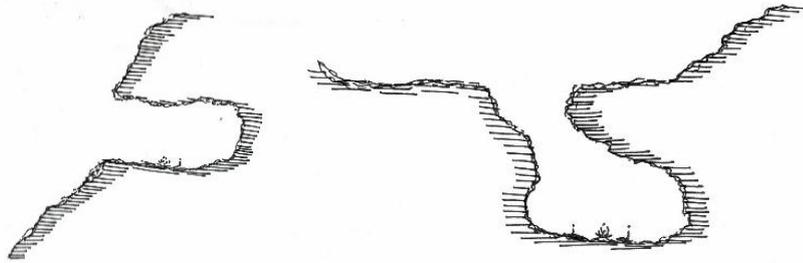


Figura 7: Representación de cuevas. Elaboración propia

En las construcciones subterráneas, tanto naturales como artificiales, la iluminación es cenital. Este tipo de iluminación condiciona el espacio en toda su forma dado que estamos acostumbrados a una iluminación natural por la construcción en altura. La luz cenital proporciona una luz sutil que invade todo el espacio. Se puede ver de manera muy clara en grandes ejemplos de la arquitectura como son el *Panteón* o el *Museo Kimbell* de Louis Kahn. En ambos edificios, la luz cenital tiene un papel crucial en la descripción del espacio, pues todo lo que habita se organiza alrededor.

Por otro lado, otros tipos de arquitectura enterrada sin salida directa al exterior, es decir, enterrada a más de distancia de la cota de suelo, encontramos que, en su mayoría, la luz también es cenital, pues busca esa iluminación que proviene de la superficie. Un ejemplo de esta arquitectura serían las galerías comerciales que conectan distintas estaciones de metro en Japón. Estas avenidas, convenientemente iluminadas, muestran un espacio agradable y bien iluminado, que dista de la imagen de lugar lúgubre y cerrado que incita la palabra *subterráneo*.



Figura 6: Gruta de Son Doòng, Vietnam



Figura 8: Museo Kimbell, L. Kahn



Figura 9: Galerías comerciales en Japón

2.2. Evolución de la arquitectura subterránea

La arquitectura subterránea se distribuye a lo largo del espacio y del tiempo, concentrándose en lugares en donde la disposición climática es más favorable para este tipo de construcciones. Una razón fundamental que impulsa al ser humano a construir bajo tierra es la protección frente a atacantes, sean estos animales o incluso otras personas. Esta cualidad ha provocado la creación de búnkeres y espacios de refugio más modernos, en comparación a la arquitectura primitiva.

Por tanto, la tipología de la arquitectura subterránea ha evolucionado desde sus inicios hasta nuestros días.

- Arquitectura subterránea horizontal. Se trata de un tipo de construcción con una única altura, excavada horizontalmente a la que se le pueden añadir alturas formando hileras. Este tipo de vivienda es la más habitual, ofreciendo un buen aislamiento térmico y una organización funcional del espacio al establecerse relaciones entre las distintas alturas [Villar Navascués, 2016].

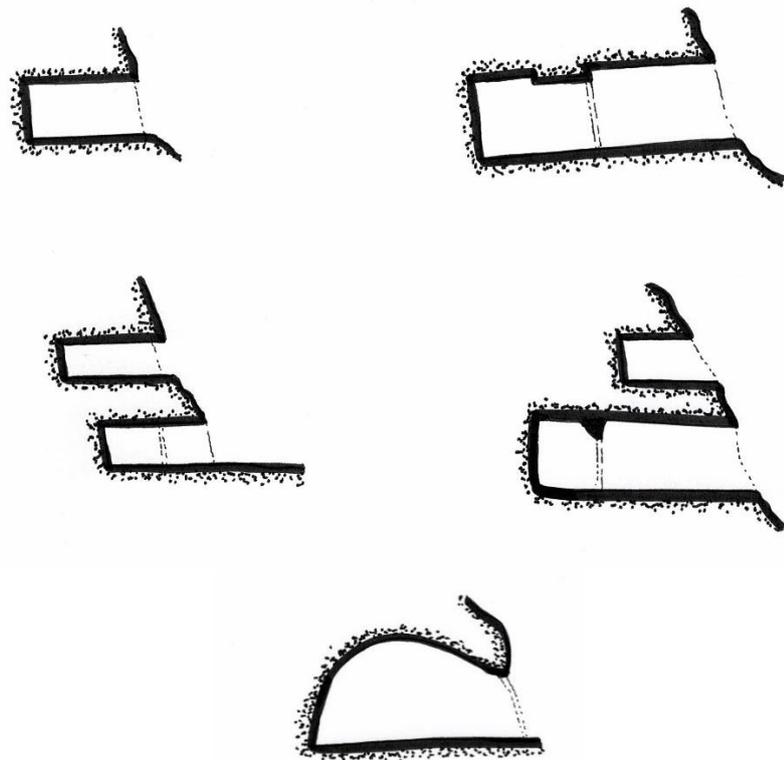


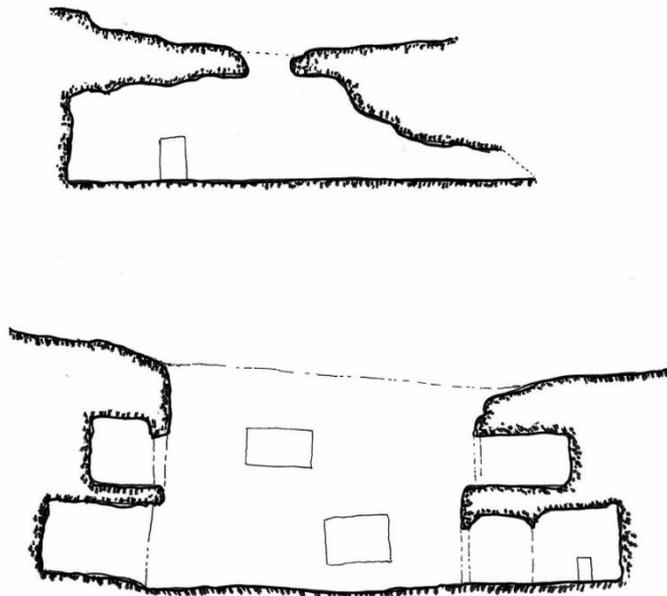
Figura 10: Tipología de arquitectura subterránea horizontal. Nombres de arriba abajo y de izquierda a derecha: Cueva simple, cueva con cámaras, cueva escalonada en ladera, cueva horadada, cueva en repisa. Elaboración propia.

- Arquitectura subterránea vertical. Se trata de un tipo de construcción iniciado en China, donde predominan los terrenos de loess¹. Este tipo de cavidades se daban en condiciones muy rudimentarias, presentando problemas de excavación y protección frente a agentes naturales externos como el viento, el sol o el agua [Villar Navascués, 2016].



Figura 11: Tipología de arquitectura subterránea vertical. Nombres de izquierda a derecha: Cueva recta, cueva en saco. Elaboración propia.

- Tipología de arquitectura subterránea mixta. Se da en lugares sin elementos montañosos o pendientes pronunciadas. Se caracteriza por abrir, en primer lugar, un patio central interior para generar un plano horizontal más profundo y disponer las cavidades alrededor de ese vacío central. Este tipo posee grandes ventajas ya que ofrecen una mejor iluminación, posibilidad de mimetización con el terreno y la existencia de un microclima debido al patio central [Villar Navascués, 2016].



¹ Depósitos sedimentarios limosos de origen eólico. Son partículas de entre 10 y 50 micrómetros y son transportados por tormentas de polvo. Poseen un característico color amarillento y carecen de estratificación.

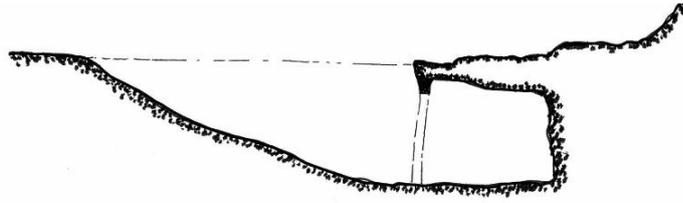


Figura 12: Tipología de arquitectura subterránea mixta. Nombres de arriba a abajo: Cueva de doble acceso, cueva desde patio, cueva desde rampa. Elaboración propia.

2.3. Aspectos generales de las construcciones subterráneas

Existen dos razones fundamentales para la construcción de arquitectura subterránea. Una razón son las características físicas del terreno, que incluyen el clima, la topografía y la litología, influyendo en la viabilidad, la estabilidad y la duración de la construcción. La otra razón para su construcción son los factores socioculturales, que incluyen estructura, jerarquía y tipo de producción o explotación que sostiene ese grupo social [Villar Navascués, 2016].

2.3.1. Clima

En primer lugar, antes del diseño y la construcción, es preciso comprobar el clima, la topografía, el suelo y el nivel freático del lugar. En cuanto al clima, numerosos estudios demuestran que las construcciones subterráneas son más efectivas en entornos con temperaturas extremas y muy baja humedad. La temperatura del terreno varía mucho menos que la temperatura del aire en estas zonas, por lo que la tierra absorbe el exceso de calor para mantener el edificio a una temperatura templada durante temporadas de frío [Williams, 1997].

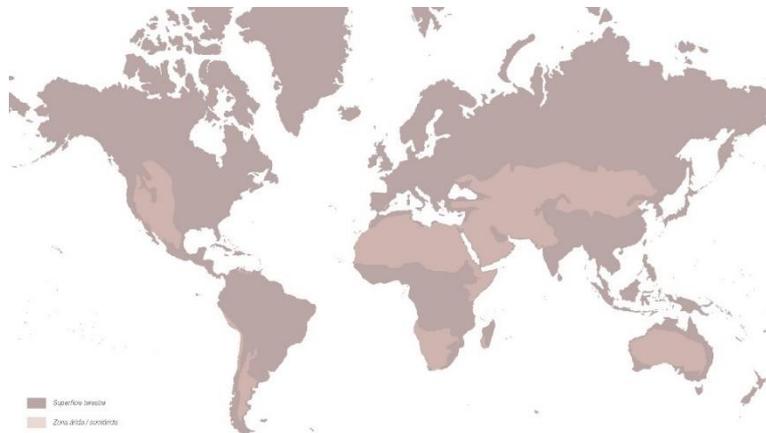


Figura 13: Mapa del mundo con zonas secas o áridas señaladas. Elaboración propia basado en la clasificación climática de Köppen.

2.3.2. Profundidad

La arquitectura subterránea está presente en infinidad de lugares a lo largo del mundo. Se extienden en el espacio, yendo desde la construcción mínima hasta la más compleja de nuestros días, y en el tiempo, desde la primera cueva habitada hasta las construcciones de la actualidad. Para poder establecer unos límites de hasta dónde se ha conseguido construir, se hace una recopilación las construcciones más profundas hasta la fecha:

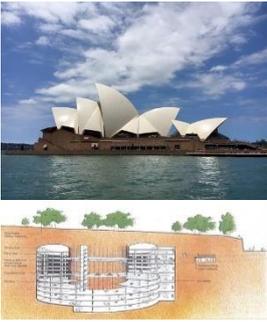
FOTOGRAFÍA	LOCALIZACIÓN	DESCRIPCIÓN
	Ópera de Sídney, Australia.	La ópera de Sídney se eleva 61 metros sobre el puerto del mismo nombre. La característica destacable es que su cimentación se extiende casi lo mismo por la superficie que por el subsuelo, llegando a profundizar 37 metros, convirtiéndolo en el edificio con mayor sótano.
	Estación Arsenalna, Ucrania	Con una profundidad de 105 metros, la estación de Arsenalna es la más profunda del mundo. La razón de su profundidad radica en la topografía de Kiev, donde existen zonas montañosas acompañadas de otras a nivel del mar.
	Complejo olímpico de Gjøvik, Noruega.	Se diseñó durante los Juegos Olímpicos de invierno de 1994. Es una pista de hockey con capacidad para 5.500 espectadores y cuenta con una piscina olímpica. Se retiraron 140.000 m ³ de roca, llegando a una profundidad de 55 metros. Las razones expuestas para construir una pista olímpica adherida a una montaña fueron no utilizar terreno de la ciudad, pues escaseaba, no retirar la pista al extrarradio y reducir los costes de climatización.
	Colisionador de hadrones, Francia y Suiza	Esta construcción se ubica a 175 metros bajo la frontera entre Francia y Suiza. Es una estructura de 27 kilómetros de largo, construida en el subsuelo como protección frente a la radiación.
	Laboratorio subterráneo de JinPing, China	Al igual que el colisionador de hadrones, la razón de su subterránea construcción es disminuir al mínimo la exposición a la radiación durante la experimentación. Se localiza a 2,4 kilómetros de la superficie, bajo una montaña al oeste de China.



Figura 14: Pozo súperprofundo de Kola, Rusia

A pesar de que estas son las construcciones más profundas que se conocen, el ser humano ha llegado a lugares más profundos, conociéndose una excavación minera en Sudáfrica de cuatro kilómetros de profundidad o 12,2 kilómetros en Rusia, el pozo superprofundo de Kola [Ravenscroft, 2017]. Este último se trata de un proyecto de investigación científica de la URSS para profundizar en la corteza Terrestre. Su principal fin era la investigación de la litosfera en donde la discontinuidad de Mohorovičić se acercaba a la superficie terrestre. Este pozo estaba entre la corteza, compuesta por basalto y el manto superior, formado por silicato de aluminio [Piesing, 2019].

Por lo tanto, no existe un claro límite de excavación bajo tierra. Actualmente el máximo está en 2.400 metros en construcciones y en 12.200 metros en excavación. Sin embargo, no es solo la posibilidad de excavación lo que limita, sino la necesidad de este. Todas las perforaciones previamente mencionadas tienen una razón, sea de investigación, aislamiento, protección, ahorro o forma del terreno.

2.3.3. Maquinaria

La maquinaria también es un condicionante, pues el ser humano es capaz de excavar hasta donde la herramienta es capaz de llegar. Los aparatos que se conocen en la actualidad para la excavación son retroexcavadoras, palas cargadoras, camiones, tractores, bulldozer, traíllas, camiones dumpers, motoniveladoras y mototraíllas [Construmática, 2003].



Figura 15: Máquina bulldozer

- Excavadora: Su uso principal es el de abrir huecos destinados al paso de tuberías, cables, drenajes, etc. Y, también, para excavar cimientos o rampas en el solar.
- Retroexcavadora: Al igual que la excavadora, se emplea para hacer huecos en el terreno con la diferencia de que esta incide sobre el terreno excavando desde la superficie al interior. Se utiliza cuando la perforación no está a la misma cota que el plano de apoyo.
- Pala cargadora: Se trata de unas palas mecánicas montadas sobre ruedas o cadenas. Se utilizan principalmente para el movimiento de tierras, revestimiento de taludes, relleno de zanjas y transporte de materiales.
- Bulldozer: Es una máquina de excavación y empuje para la nivelación de terrenos. Se caracteriza por su dificultad al vuelco en pendientes pronunciadas, por lo que es óptima para trabajar en terrenos abruptos.
- Camión dúmper: Se utiliza para transporte de grandes volúmenes de tierra o roca.
- Traílla: Máquina utilizada para la ejecución de terraplenes y desmontes en grandes movimientos de tierras.



Figura 16: Máquina traílla

- Mototraílla: Elemento que remolcado por un tractor o autoimpulsado, sirve para cargar o transportar tierra.
- Motoniveladora: Se suele usa para la nivelación del terreno.
- Escarificador o subsolador: Elemento dentado empleado para despedazar suelos compactos y rocas semiduras.
- Apisonadora: Elemento cilíndrico de gran peso acoplado a la estructura del tractor y se emplea para allanar la tierra.

2.3.4. Terreno y topografía

La topografía determina cómo de fácil es construir bajo un terreno. Cuando es una construcción totalmente enterrada hay que excavar todo el terreno, sin embargo, cuando se trata de una construcción semienterrada se pueden aprovechar terrenos con pendiente para precisar de una menor excavación.

El suelo es otra gran consideración dado que, según el suelo, la excavación puede ser más sencilla, más complicada o incluso imposible. Los suelos granulares tales como arena o grava son los más recomendables para excavaciones dado que tienen buena compactación y es muy permeable permitiendo un rápido drenaje del agua. Los suelos menos recomendables serían arcillosos cohesivos dado que pueden expandirse al mojarse y tienen poca porosidad [Williams, 2019].



Figura 17: Suelo granular

2.3.4.1. Contaminantes en el subsuelo

La contaminación en el subsuelo se produce por la presencia de elementos o compuestos químicos que alteran el ambiente natural del suelo. Es un tipo de contaminación muy peligroso, pues no es evidente hasta que las consecuencias son visibles en seres vivos.

La *contaminación* en el subsuelo puede aparecer de forma natural, por ser propiedad del terreno, o de forma artificial por contaminación humana. Esta última puede ser por pruebas atómicas, accidentes nucleares, tecnología agrícola nociva o acumulación de basura urbana. En cuanto a la contaminación natural del terreno, es decir, la imposibilidad de explotación del suelo por características intrínsecas al mismo, caben destacar los metales pesados tales como el Arsenio, Cadmio, Cobalto, Cobre, Mercurio o el Plomo. Estos son denominados metales tóxicos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas y otros seres vivos.

Como mención especial dentro del apartado de contaminantes en el subsuelo se sitúa el radón. El radón es un gas radioactivo de origen natural que proviene de la desintegración del radio, el cual, a su vez, procede de la desintegración del uranio contenido en rocas como el granito. La causa de su gravedad es que es imperceptible por el ser humano. Es la fuente de

radiación natural por excelencia, siendo capaz de adherirse a las pequeñas partículas de polvo que gravitan en el aire, pudiendo acceder y acumularse en los pulmones, causando mutaciones en las células del aparato respiratorio e incluso provocar cáncer.

Sin embargo, su presencia en el aire es muy escasa, en muy bajas concentraciones, dado que al aire libre se diluye rápidamente. No obstante, el problema radica en los espacios cerrados ya que puede llegar a concentrarse, lo que supone un gran riesgo para la salud dado que es un gas incoloro, inodoro e insípido. Al existir en el terreno, su acumulación puede liberarse a través de la cimentación de los edificios y llegar al interior de estos, causando graves problemas si no existe una ventilación adecuada. Este inconveniente se agrava en el caso de las construcciones subterráneas, pues la ventilación suele ser mecánica y el contacto con el terreno es mayor. Dado que el radón es un gas, está formado por moléculas pequeñas, que pueden penetrar en los espacios interiores a través de fisuras en los materiales.

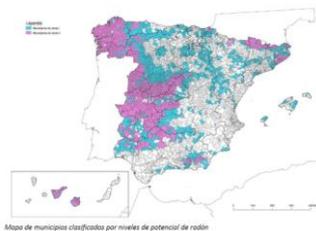


Figura 18: Mapa de municipios en España potencialmente afectados por el gas Radón, siendo la zona rosa la de mayor gravedad, seguido de la azul de gravedad intermedia y la zona gris que no presenta riesgo

La normativa española exige interponer una barrera física al radón cuando el edificio se ubica en municipios en donde la existencia de este gas supera al valor de referencia. Esta barrera física debe ser impermeable al gas y continua (sin fisuras), cubriendo toda la construcción expuesta al terreno, tanto en vertical como en horizontal [Sarachu, 2019].

2.3.4.2. Cimentación compensada

Otro elemento a tener en cuenta a la hora de diseñar arquitectura subterránea es el concepto de cimentación compensada. Es una propiedad de las estructuras que aparece al construir bajo tierra. Se basa en la premisa de que el peso de la estructura sea igual al peso de la tierra excavada. Esto ayuda a reducir el incremento de carga sobre el terreno, equilibrando la presión que ejerce la estructura sobre el terreno.

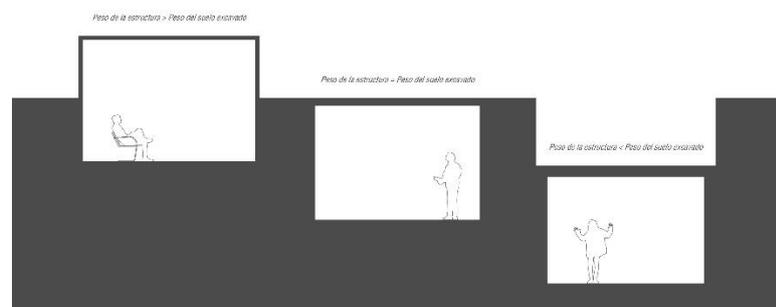


Figura 19: Descripción gráfica de cimentación compensada. Elaboración propia

2.3.5. Materiales en la arquitectura subterránea

Los materiales de construcción a emplear en cada edificio dependen de diversos factores como las características del lugar, el clima, el suelo y, por supuesto, el diseño. Sin embargo, la construcción ha demostrado que los edificios enterrados precisan de materiales más resistentes y duraderos. Cuando el terreno está húmedo o congelado, la presión que ejerce sobre las paredes y el suelo aumenta, por lo que estos materiales deben tener la capacidad de soportar la presión y la humedad del terreno que los rodean. Además, señalar que la presión aumenta según la profundidad de la excavación y que una humedad alta en el terreno puede conducir a la existencia de un nivel freático próximo.

El hormigón es una elección habitual para la construcción de edificios enterrados debido a su resistencia, durabilidad y resistencia al fuego. El hormigón armado vertido in situ suele utilizarse para elementos estructurales como zapatas, losas y muros exteriores de menos de dos metros de profundidad. Sin embargo, para techos, suelos y paredes es más recomendable utilizar hormigón prefabricado, dado que reducen el tiempo y el coste de la construcción. El hormigón tiene la capacidad de absorber y almacenar calor, ayudando a prevenir cambios bruscos de temperatura que pueden poner en riesgo la estructura.

La madera es un material natural cálido y, complementado con otros materiales como la piedra, el ladrillo o el hormigón, puede soportar presiones horizontales que ejerce el terreno. Sin embargo, el incremento del coste asociado al uso de la madera restringe su uso en construcciones subterráneas. Además, su característica de material natural provoca un mal comportamiento frente a la falta de ventilación y humedad que puede darse si no está bien diseñado el edificio.

El acero suele utilizarse para las vigas, viguetas, columnas y como armado del hormigón. Es muy versátil debido a su alta resistencia a tensiones y compresiones. Sin embargo, el principal inconveniente del acero es su necesidad de protección frente a la corrosión, dado que si va a estar expuesto a la humedad o próximo al nivel freático debe estar recubierto y protegido.

A pesar de que en una construcción subterránea el aislamiento no necesita tener tanto espesor como en un edificio convencional, es inevitable su colocación para conseguir una estancia agradable. El aislamiento debe colocarse en la cara más exterior del edificio, después de haber colocado el material drenante, para que el calor generado quede dentro de la estancia. Además, se debe colocar una capa protectora para proteger al aislante del terreno.

2.4. Recursos energéticos renovables del subsuelo

La energía geotérmica es un tipo de energía renovable que aprovecha el calor generado y almacenado en la tierra. La energía interna de la tierra es la energía geotérmica generada por la descomposición de elementos radiactivos y la continua pérdida de calor que se produce del núcleo de la Tierra. La temperatura que puede llegar a alcanzar el núcleo oscila entre los 4000 hasta los 5500°C. La alta temperatura y la presión provocan que las rocas se derritan y que la capa del manto se comporte de forma plástica, produciendo un movimiento de la lava en el interior y un movimiento de las placas tectónicas en el exterior, por el fenómeno de conducción debido a la diferencia de temperaturas entre el núcleo y la corteza.

La manifestación en la superficie de este tipo de energía está en los géiseres, si hay presencia de líquido, o calentando directamente piedras u otros materiales. La energía geotérmica se aprovecha mediante el uso de plantas geotérmicas situadas en yacimientos, normalmente entre placas tectónicas.

Para el aprovechamiento de esta energía, se deben realizar excavaciones para crear pozos. El método es convertir el agua en vapor a través del calor que irradia la tierra y, con ese vapor, mover una turbina que genere energía eléctrica, u otro tipo de energía.

La energía geotérmica es barata, renovable, sostenible y segura, pero ha estado históricamente limitada por su proximidad y relación con los límites de las placas tectónicas. A pesar de ser capaces de cubrir las necesidades energéticas que demanda el ser humano, no llega a ser extremadamente rentable su explotación. Esto se debe a que la excavación y obtención es muy costosa debido a la profundidad.

Por tanto, en la búsqueda de reducir el consumo de la energía, se debe empezar por el entendimiento del edificio para determinar qué necesidades demanda para ser un espacio agradable, incluyendo los aspectos de confort en cuanto a humedad y temperatura, luz solar y calidad del aire [García, 2018].



Figura 20: Planta de producción de energía geotérmica

2.5. Ejemplos de interés

- Derinkuyu se encuentra en Capadocia (Turquía) con otras cuarenta ciudades subterráneas. Derinkuyu ofrecía alojamiento a cerca de 20.000 personas y fue continuamente ocupada desde el siglo VIII a.C. hasta 1923, aproximadamente.

En el interior de la ciudad, pueden observarse establos, comedores, salas para el culto, cocinas (aún ennegrecidas por el hollín de los

hogares), prensas para el vino, bodegas, cisternas de agua y áreas habitacionales. La ciudad cuenta con pozos de agua y galerías de comunicación [Madapur, Manikoth, Raina, 2019].

En total, se han detectado 52 pozos de ventilación. Se calcula que estas instalaciones eran suficientes para dar refugio a unas diez mil personas. El laberinto de corredores cuenta además con tres puntos estratégicamente seleccionados, cuyo acceso podía ser bloqueado, desplazando las rocas adyacentes; impidiendo así la entrada de visitantes indeseados.



Figura 21: Derinkuyu, Turquía



Figura 22: Vista interior Derinkuyu, Turquía

- Un gran ejemplo de ciudad subterránea en Hong Kong es Tsim Sha Tsui (TST). Se localiza en el sur de la península de Kowloon. Desde el año 2000 se ha ido desarrollando una nueva forma de movimiento peatonal que amplía la originaria estación de Tsin Sha Tsui. Tras diez años de construcción, el espacio subterráneo TST está compuesto por seis niveles de pasos peatonales que conectan dos grandes estaciones de metro y numerosos centros comerciales.

El diseño de la infraestructura subterránea TST ha tenido dos efectos principales. El primero muestra que las calles subterráneas albergan mayor afluencia de peatones que en las calles de la superficie. El estrato inferior peatonal actúa como sustituto de la calle superior, aliviando la confluencia de personas. La segunda muestra cómo la existencia de centros comerciales y tiendas facilitan la evacuación dado que distribuyen el tránsito de los peatones y tienen conexión directa vertical con la superficie en muchos casos, aquellas tiendas que no tienen salida directa desde la tienda poseen una salida directa al centro comercial que lo alberga [Soloman, Frampton, Wong, 2012].

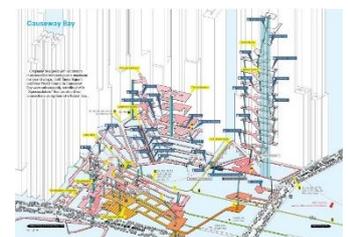


Figura 23: Proyecto Tsin Sha, Hong Kong



Figura 24: Casa en Sierra Norte de Sevilla, Felipe Palomino

- La Casa en Sierra norte de Sevilla es una vivienda unifamiliar diseñada por el arquitecto Felipe Palomino. En ella, se buscó, mediante el diseño, la integración de la arquitectura en el terreno para su total mimetización. Otra premisa del diseño es la creación de un espacio sin referencias para invitar a la meditación y la tranquilidad, por ello la casa carece de ventanas exteriores. La ventilación del interior se realiza mediante dos grandes patios interiores, buscando siempre la intimidad y el sosiego. El presupuesto de la obra asciende hasta 72.000 € y la superficie construida es de 116 metros cuadrados [Franco, 2012].



Figura 25: Hospital subterráneo en Bailía de Jersey, Reino Unido.

- En Alemania existe un hospital subterráneo construido durante la Segunda Guerra Mundial para el tratamiento de enfermos. Se trata de un laberinto de túneles que cubren un área de 6.950 metros cuadrados cuyo contacto con el exterior se realiza únicamente desde las entradas, el resto del edificio es imperceptible desde la superficie. Esta edificación se comenzó en 1942 como un fuerte que servía como protección durante la guerra; su estructura era fundamentalmente de hormigón armado. Posteriormente, en 1944 se modificó su uso para convertirse en un hospital. En la actualidad es un museo dedicado a la historia del nazismo en Alemania [Hospital subterráneo Hohlgangsanlage 8, (s.f.)].



Figura 26: Colegio Wildwood en Aspen (Colorado, EEUU), David F. Gibson

- La escuela infantil Wildwood en Aspen se construyó en 1974 dando lugar a un espacio integrado con la naturaleza para los primeros años de infancia de los niños. Este edificio posee 340 metros cuadrados situados bajo tierra en una única planta. Las razones de su construcción subterránea responden, en primer lugar, para la integración del edificio en la naturaleza, pues está rodeado por un bosque; y, en segundo lugar, por el ahorro energético que supone su ubicación enterrada ya que Aspen es una ciudad fría que puede alcanzar hasta los -15 °C.

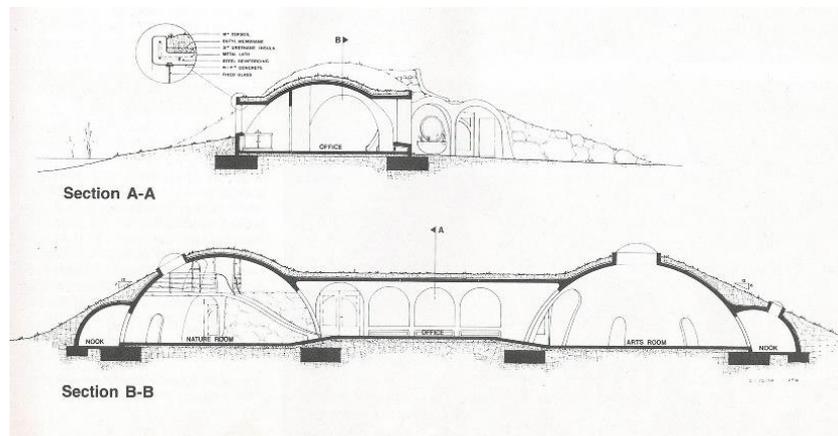


Figura 27: Sección del Colegio Wildwood

A pesar de la carencia de ventanas que produce este tipo de arquitectura y la repercusión que tiene en nuestra percepción del espacio, el diseño de este edificio aprovecha esa cualidad para dar un carácter único al edificio, pensando cada espacio para su uso por los niños. El interior está iluminado mediante lucernarios colocados sobre las dos grandes cúpulas. La elección de la forma de cúpula responde a la eficiencia estructural que esta posee, soportando mejor las tensiones generadas en el terreno. Debido a su naturaleza curva, el aislamiento del edificio se realiza mediante poliuretano proyectado, que posteriormente se recubre con una membrana impermeable [Carmody, Sterling, 1983].

- La biblioteca municipal Walker se ubica en una de las avenidas más concurridas de Minneapolis. Se trata de un edificio enterrado cuya entrada se produce por la cubierta. La razón de su construcción bajo tierra radica en el aprovechamiento del aislamiento acústico y el ahorro energético. Otra de las razones para su construcción subterránea era la falta de espacio superficial en esa zona, por lo que la cubierta del edificio deja espacio para exposiciones de arte o incluso para aparcamiento. Los materiales empleados para su construcción fueron hormigón armado para la estructura y ladrillo para la parte exterior vista. Para el aislamiento se empleó poliestireno extruido tanto en la fachada como en la cubierta. La iluminación interior se realiza a través de una gran ventana de 19 metros cuadrados cuya luz incidente se hace reflejar sobre un espejo colocado a 45° respecto de la ventana para iluminar todo el espacio interior.

La construcción del edificio se finalizó en 1980, dando lugar a un espacio de 1720 metros cuadrados, con un coste aproximado de 1,2 millones de euros [Carmody, Sterling, 1983].



Figura 28: Biblioteca municipal Walker en Minneapolis (Minnesota, EEUU), BRW Architects

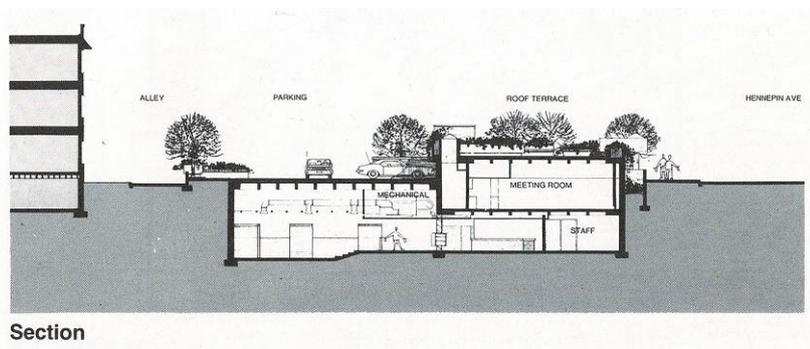


Figura 29: Sección de la Biblioteca municipal Walker



Figura 30: Ampliación de la Sede Mutual of Omaha en Omaha (Nebraska, EEUU), Leo A. Daly Company

- La ampliación de este edificio de oficinas en Omaha trajo consigo varios problemas de diseño dado que una integración perfecta entre un edificio ya existente y su ampliación era una dificultad en la elaboración del proyecto. Por ello, se propuso el diseño de una estructura totalmente enterrada, iluminada a través de una gran cúpula, cuya cubierta sirve como plaza al edificio ya existente. La organización del nuevo edificio se realiza a través de tres plantas, en donde la más próxima a la superficie alberga los usos de biblioteca, zona verde, cafetería, sala de conferencias y centro de entrenamiento. Las plantas inferiores no tienen contacto directo con el exterior y se utilizan como zona de almacenamiento.

La construcción de la ampliación debió realizarse con extremo cuidado, pues su situación era colindante a la estructura de un edificio ya existente. En cuanto al uso de energía, el ahorro que conlleva su posición subterránea y la generación de calor por parte de los trabajadores y las máquinas redujo en gran medida la demanda energética del edificio, estimándose el ahorro desde un 30 hasta un 50% en comparación con un edificio sobre rasante.

El edificio se construyó en 1979, ofreciendo un espacio de 17000 metros cuadrados, con un coste de 10,1 millones de euros [Carmody, Sterling, 1983].

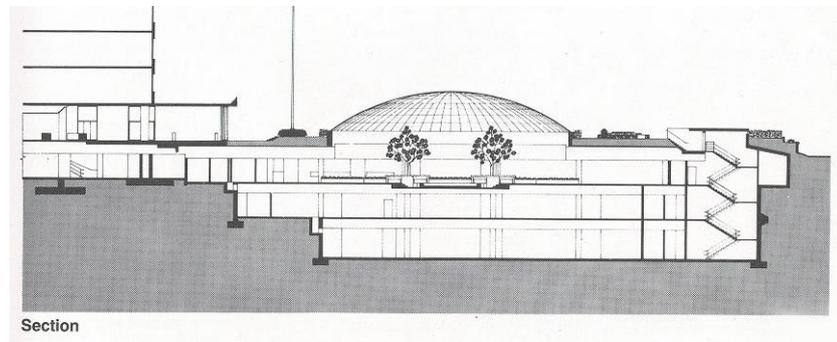


Figura 31: Sección de la Ampliación de la Sede Mutuals of Omaha (Nebraska, EEUU)



Figura 32: Colegio Terraset, Fairfax County (Virginia, EEUU)

- En la localidad de Fairfax County (Virginia, EEUU), el colegio Terraset aprovecha los numerosos beneficios de la construcción subterránea. Su construcción finalizó en 1977, siendo un modelo de referencia para futuros colegios, entre ellos el colegio Terra inaugurado en 1980. El arquitecto y promotor de esta construcción utilizó el colegio Terraset como lugar de experimentación tanto energéticamente como lugar de aprendizaje. Otra razón que contribuyó a su diseño subterráneo fue la forma del terreno virgen antes de la excavación. Este presentaba ligeras elevaciones, las cuales trataron de simularse en la cubierta del nuevo edificio. Además del ahorro energético, el arquitecto Douglas Carter se propuso el mayor aprovechamiento del

suelo y el espacio. Defiende que, con este diseño, se ha ahorrado aproximadamente un 11% en lugares de conexión interior.

La entrada de la luz se hace fundamentalmente por los grandes ventanales situados en las paredes de la cúpula que cubre las aulas. La cubierta está hecha con hormigón armado de gran espesor, lo que protege el interior de las temperaturas exteriores extremas. Sin embargo, es inevitable la pérdida de un 55% de la energía por la cubierta. Por ello, posteriormente, se incrementó el aislamiento en la cubierta y modificando la instalación de climatización para redireccionar el aire [Carmody, Sterling, 1983].

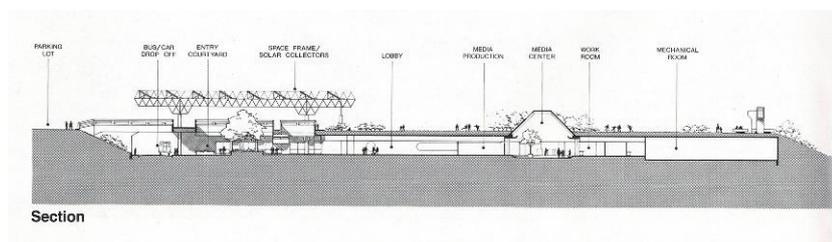


Figura 33: Sección Colegio Terraset, Fairfax County (Virginia, EEUU)

3. Casos de estudio

3.1. Justificación de casos

Como se ha mencionado al inicio del presente trabajo, para llevar a cabo la investigación de la arquitectura subterránea, se acota el estudio eligiendo tres ejemplos de arquitectura subterránea ejemplar a diferentes escalas: edificio, infraestructura y ciudad. La razón para escoger los siguientes ejemplos radica en su variedad tanto escalar como formal.

Así pues, la *Casa Rascainfernos* de Fernando Higuera es un ejemplo de arquitectura subterránea a escala edificio muy exitoso. Es una vivienda de referencia no solo en la arquitectura subterránea sino en el diseño y habitabilidad. Es un espacio accesible dado que está en Madrid y ofrece visitas guiadas, por lo que su estudio puede ser más exhaustivo y su diseño puede servir de referencia a futuras viviendas enterradas.



Figura 34: Casa Rascainfernos, Fernando Higuera

Son muchas las ciudades con gran índice de población en donde la cota de suelo se ha dividido en dos o más plantas para el tránsito de peatones. Históricamente, estas galerías subterráneas se habrían como conexión entre las estaciones de metro que ya se situaban bajo tierra, para liberar así espacio en la superficie. Este caso de infraestructura subterránea o galería comercial enterrada se da en más lugares del mundo, pero es más común en Asia debido a la escasez de suelo por la gran densidad poblacional, ya que el 61% de la población mundial vive en Asia (4.700 millones) [Naciones Unidas, (s.f.)]. Se seleccionan las galerías subterráneas de *Crysta Nagahori* debido a su evolución y adaptación al crecimiento urbanístico y poblacional de Osaka. Por ello, se analiza, además, su respuesta social y urbana por parte de la ciudad y sus habitantes.



Figura 35: Galerías subterráneas Crysta Nagahori

Por último, la ciudad subterránea de Montreal es un referente de arquitectura subterránea por su extensión. Las razones de construcción responden a un fenómeno climático, y no espacial como ocurría en las galerías, dado que en la ciudad de Montreal existe un salto térmico de hasta 60°. Es un ejemplo de arquitectura aún en uso intensivo desde su construcción en 1962, por lo que responde correctamente a la demanda social. Es interesante su estudio por su adaptación a una necesidad de protección contra el frío, convirtiéndose en la ciudad subterránea con mayor extensión.



Figura 36: Ciudad subterránea de Montreal

Además de la escala, forma y de su razón de construcción, los tres ejemplos son considerados arquitectura contemporánea, por lo que sus sistemas constructivos son aplicables actualmente e, incluso, en el futuro próximo. Dado que este trabajo pretende estudiar la viabilidad y la construcción de la arquitectura subterránea con vistas a futuro, la elección de estos tres ejemplos puede abarcar de manera fructífera este análisis.

3.2. Casa Rascaifernos, Fernando Higuera

En el año 1972, el arquitecto Fernando Higuera inició la construcción de *El Rascaifernos*. Esta vivienda particular, que posteriormente se convertiría en el estudio y residencia del arquitecto, se sumerge en el subsuelo de la ciudad de Madrid, cuya composición del suelo es de arcosas, arcillas arenosas y limos [IGME, (s.f.)].

Higuera defendía la idea de volver a las cuevas, a los inicios, oponiéndose de manera contundente a la arquitectura modernista. La excavación del terreno se realizó por el mismo arquitecto utilizando como maquinaria un pico y una pala, dado que el volumen de la construcción no iba a ser grande y la maquinaria excedía a la demanda. La profundidad del edificio desciende hasta los 8 metros, dando lugar a un volumen de 9x9x8 metros cúbicos, es decir, 81 metros cuadrados en superficie y 648 metros cúbicos. El acceso desde el exterior se realiza mediante una escalera a cota de calle que desciende hasta el primer nivel. La llegada desde este primer nivel hasta el segundo se hace por una escalera de caracol independiente a la de acceso.

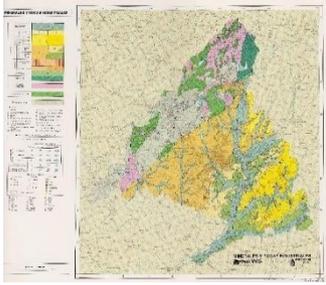


Figura 37: Mapa de minerales y rocas industriales de Madrid - Atlas geocientífico de Madrid



Figura 38: Vista desde la superficie



Figura 39: Sección de El Rascaifernos



Figura 40: Vista entre el estudio y el salón

«Tenía un enorme aprecio e interés por la arquitectura vernácula, admiraba la bella funcionalidad de una arquitectura creada en total equilibrio con el entorno. Existía en él una búsqueda constante de este ‘orden superior’, de la armonía. Usaba la luz, la sombra y el volumen para encontrarla, sin nunca dejar de lado la vegetación.» Catalina Dib, 2017. ²

² Este artículo fue originalmente publicado en el blog de Catalina Dib “Katari Mag” bajo el título de “El Rascaifernos, la casa/cueva del arquitecto Fernando Higuera”. DIB, C. 2017. *Conoce la historia de ‘El Rascaifernos’, la casa/cueva del arquitecto Fernando Higuera*. Revista digital Plataforma Arquitectura. Redactado: Agosto 2017.

Higuera proponía una arquitectura armoniosa entre el hábitat humano y su entorno natural; por ello, diseñó una vivienda que se evitaría sobresalir de la tierra, mimetizándose e integrándose en la naturaleza. Otra razón que defendía la construcción subterránea era el aislamiento que ofrecía el subsuelo. Por un lado, el aislamiento acústico pues se goza de un silencio absoluto en su interior; y por el otro lado, el aislamiento térmico debido a la inercia térmica del terreno.

La temperatura media anual en Madrid es de 14,5 °C, llegando a alcanzar los 42,2 °C hasta los -15,2 °C [AEMET, (s.f.)], existiendo un salto térmico entre verano e invierno de 50 °C de media. Sin embargo, en esta casa subterránea la temperatura oscila entre los 16°C hasta 26°C durante todo el año, lo que aumenta considerablemente el confort de la vivienda evitando el empleo de climatización mecánica. [Rodríguez, 2019].

La iluminación interior se realiza mediante cuatro grandes lucernarios de 2x2 que sobresalen en el jardín que cubre la vivienda, componiendo un tragaluz de 16 metros cuadrados. La estructura es hormigón armado que cubre perimetralmente el edificio conteniendo la tierra.



Figura 41: Vista desde el salón



Figura 42: Vista bajo el lucernario

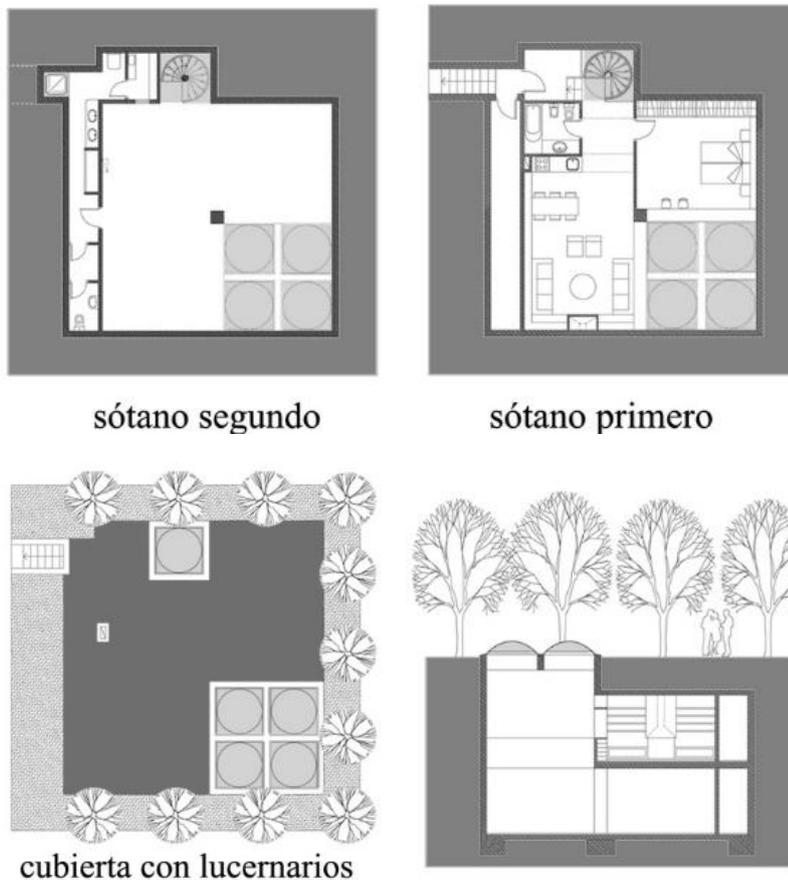


Figura 43: Plantas y sección transversal de El Rascañifernos



Figura 44: Vista desde la entrada

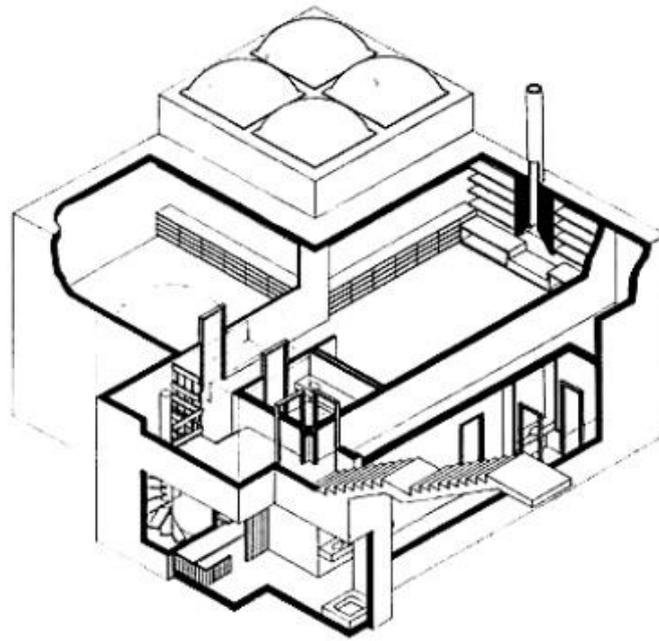


Figura 47: Axonometría de El Rascañiernos

3.3. Galerías subterráneas *Crysta Nagahori* en Osaka

Osaka es la segunda ciudad más poblada de Japón. Ubicada en el sur del país, esta región posee una densidad poblacional de 12.200 personas por kilómetro cuadrado, frente a 5.400 personas por kilómetro cuadrado en Madrid [World Population Review, (s.f.)].

Osaka posee un clima subtropical húmedo, según la clasificación climática de Köppen, estando las cuatro estaciones muy diferenciadas climáticamente. Con una temperatura media anual de 16,6 °C, llegando a alcanzar los 39,7 °C en verano hasta los 0°C en invierno, Osaka presenta un salto térmico de casi 40 °C [Agencia meteorológica de Japón, (s.f.)].

Se trata de una ciudad con gran actividad económica, situándose entre las 20 zonas de influencia más productivas del mundo junto con París y Londres. Históricamente fue la ciudad con más intercambio comercial en Japón, factor que impulsó en gran medida el avance y crecimiento de la ciudad en los durante los años setenta y ochenta. Acompañado de este gran crecimiento, se diseñó una de las ocho redes de transporte subterráneo más utilizados en la actualidad. Posee una extensión de 129,9 kilómetros y 123 estaciones.

Las galerías subterráneas de Crysta Nagahori se sitúan en la zona de mayor afluencia comercial de la ciudad. Se trata del distrito de Shinsaibashi donde se concentra la principal zona de tiendas de la

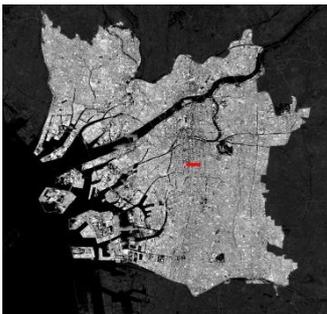


Figura 45: Mapa de Osaka, Japón



Figura 46: Vista interior

ciudad. Estas galerías se diseñaron en primer lugar como conexión entre tres estaciones que rodean la concurrida zona: estación de Shinsaibashi, estación de Yotsubashi y la estación de Nagahoribashi. Posteriormente, se les aportó un uso a las avenidas, permitiendo a los propietarios instalar sus negocios en las galerías convirtiéndose en un gran centro comercial subterráneo con 730 metros de recorrido. Superficialmente, ocupa 81.765 metros cuadrados, siendo el centro comercial subterráneo más grande de Osaka.

El metro de Osaka tuvo su primera apertura en 1933 con la línea Midōsuji ampliándose hasta la apertura de la línea Nagahori Tsurumi-ryokuchi en 1990. Sin embargo, las galerías comerciales de Crysta Nagahori no se inauguraron hasta 1997, con una recepción pobre por parte de la población debido a la mala organización comercial hasta que se reguló su uso posteriormente.



Figura 48: Entrada desde la estación Shinsaibashi

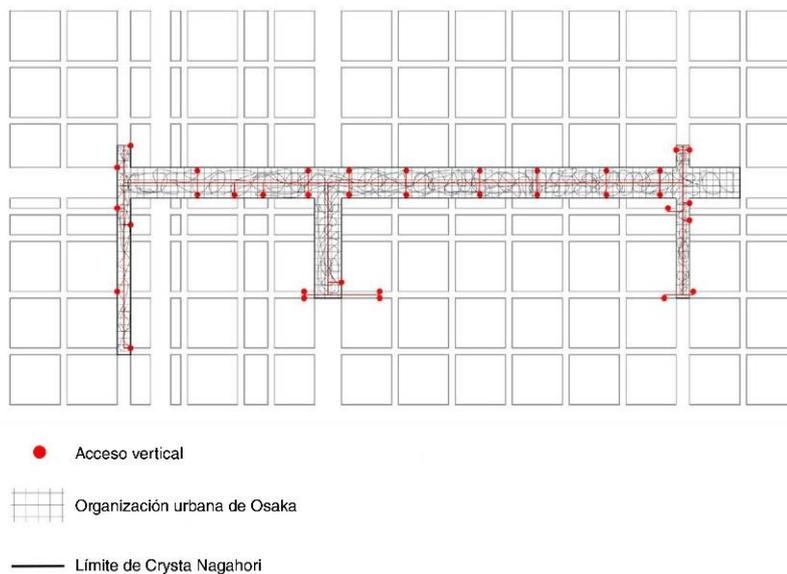


Figura 49: Organización en planta de las galerías Crysta Nagahori

El centro comercial se organiza en una única planta, existiendo una segunda inferior para el paso del tren. La iluminación del edificio se hace mediante grandes lucernarios dispuestos en la cubierta, ocupando aproximadamente un tercio de la superficie construida. El acceso a las galerías se realiza, principalmente, por cualquiera de las tres estaciones interconectadas, aunque existen, además, otras entradas a lo largo de la gran avenida que conecta el este y el oeste de la zona.

La razón de diseñar este gran espacio conector fue, principalmente, la descongestión de la calle Nagahori-dori, situada inmediatamente encima de las estaciones, dado que estas galerías son completamente peatonales. Además, la protección contra temperaturas extremas y la tranquilidad en comparación con la



Figura 50: Vista interior de la iluminación cenital

superficie. La posibilidad de esta excavación se debe a que en los años 1960, el río Nagahori circulaba por ese mismo espacio, dando lugar a un desnivel provocado por la vaguada del río [Canal Osaka BlackCat. (12 de enero de 2021)].

Los lucernarios no pueden ser abiertos, pues se trata de un espacio de uso público y el control de las aberturas se realiza por los técnicos encargados. Por ello, la ventilación del espacio se realiza de manera ajena a la iluminación, a través de toberas situadas en la parte superior de la galería [Centro comercial Crysta Nagahori, (s.f).]



Figura 51: Iluminación y ventilación en el interior

3.4. Ciudad subterránea de Montreal

En Canadá existe una ciudad en la que se construyó lo que hoy se conoce como la ciudad subterránea en uso más extensa del mundo. Ubicado en la ciudad de Montreal, este espacio enterrado recorre 32 kilómetros, cubriendo un área de cuatro kilómetros cuadrados. Fueron varias las ventajas asociadas al desarrollo de la ciudad subterránea de Montreal: mejora de la conexión entre espacios dentro de la ciudad y, por tanto, reducción de la distancia a recorrer, resguardo de las temperaturas extremas y aumento del espacio público. Además, este gran espacio está conectado con la red de transporte subterráneo, interrelacionando siete estaciones de metro [El-Geneidy, A., Kastelberger, L., Abdelhamid, H. T. (2011)].

La ciudad subterránea de Montreal se organiza mediante túneles y pasadizos que conectan bloques de viviendas, oficinas, entidades administrativas, centros culturales, universidades y redes de transporte. A pesar de su denominación, no toda la construcción es subterránea, aproximadamente la mitad de la construcción excede de la superficie.



Figura 52: Vista aérea de Montreal

La ciudad subterránea de Montreal se sitúa en la orilla oeste del río San Lorenzo que recorre la ciudad condicionando su organización urbana. Está integrado en la trama urbana dentro del distrito Ville-Marie, en donde se concentran varios rascacielos, iglesias, centros comerciales, así como restaurantes y cafeterías, constituyendo así una de las metrópolis más importantes de Quebec. Se estima que el 12% de los comercios de la ciudad.

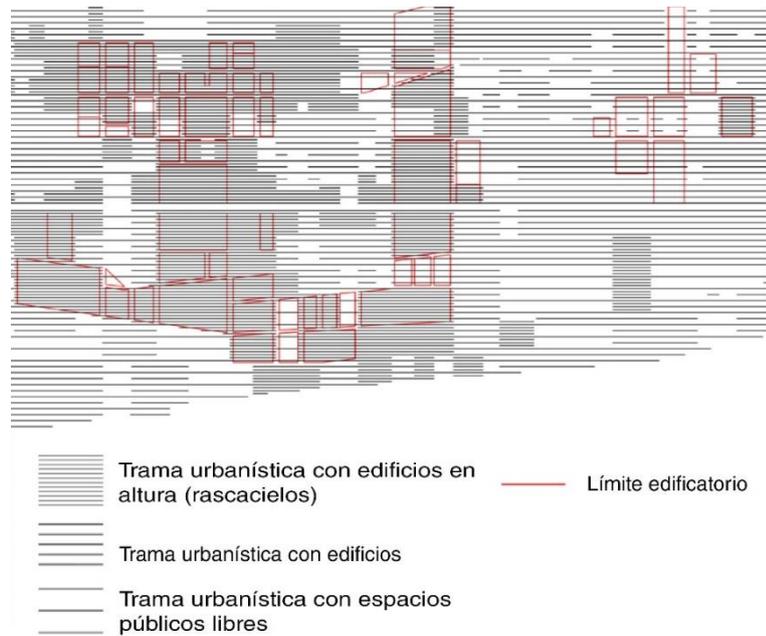


Figura 53: Organización urbanística de Montreal

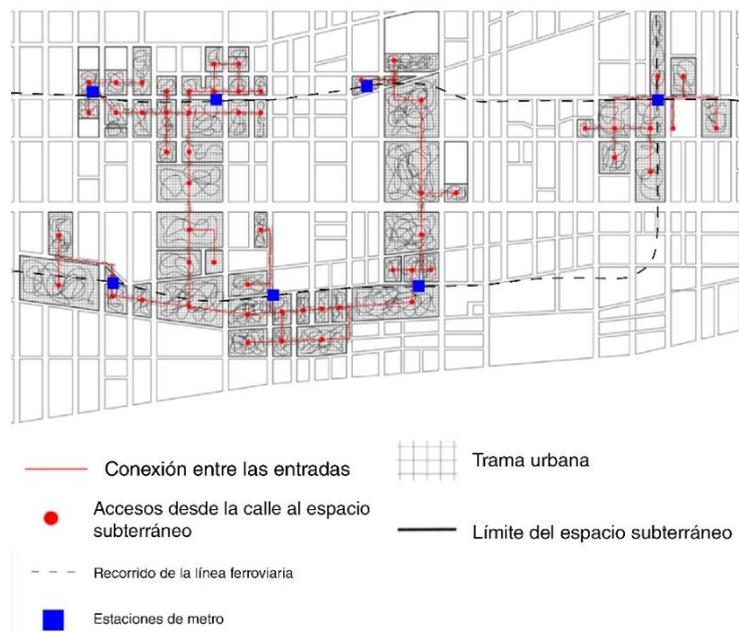


Figura 54: Entradas y estaciones de la ciudad subterránea de Montreal



Figura 55: Vista del interior 1



Figura 56: Vista desde una de las entradas

Con su inauguración en 1962, la ciudad subterránea de Montreal sufrió varias modificaciones y adaptaciones al plan urbanístico, hasta que en 2004 con el nuevo Máster Plan urbanístico de Montreal se remodeló para la mejora de la accesibilidad, mejora del diseño y de la conexión con la red de ferrocarril subterránea; modificándose, además, su nombre, pasándose a llamar RÉS0. Posteriormente, en el Máster Plan urbanístico de 2007 se regularizó la expansión para favorecer el crecimiento de este espacio.

En contraposición a las redes subterráneas en Asia diseñadas para la separación de vehículos y peatones, en Norte América se diseñan para el refugio frente a temperaturas extremas tanto de frío como de calor (Zacharias, 2001). El clima de Montreal es continental húmedo, según la clasificación climática de Köppen, con cuatro estaciones diferenciadas. En invierno, la temperatura media de la ciudad es de 6,8 °C, con mínimas entre -37,8 °C y -11 °C y máximas entre 0 °C y 16 °C. En verano, la media es de 21,5 °C, con máximas entre 23 °C y 38 °C [Climate-data, (s.f.)].

Existen más de 140 entradas al espacio subterráneo, incluyendo las que conectan la red ferroviaria con la superficie. La sección del edificio varía en extensión, por lo que la construcción posee entre tres y cuatro plantas, aunque en algunas ocasiones se reduce a dos. [El-Geneidy, A., Kastelberger, L., Abdelhamid, H. T. (2011)].

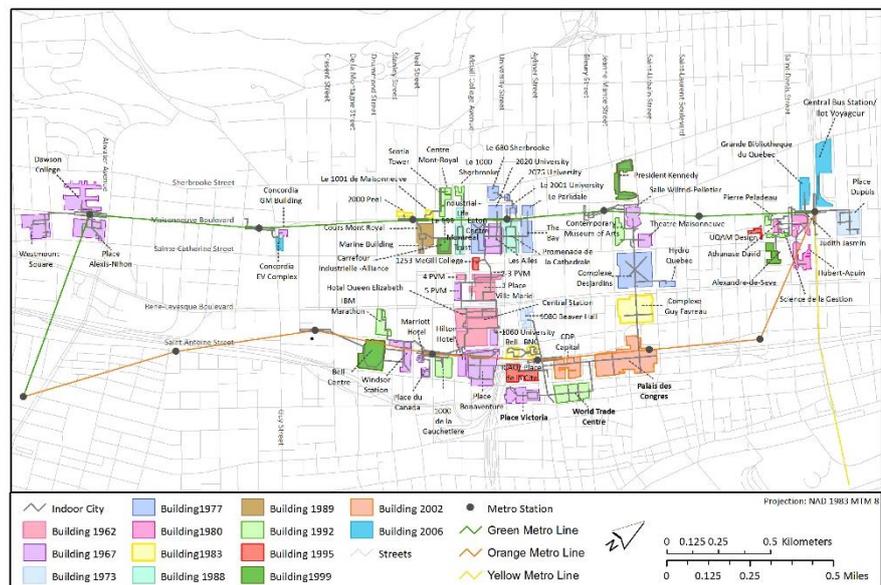


Figura 57: Evolución urbanística del RÉS0

La ciudad subterránea de Montreal se organiza en varios segmentos:

- El segmento central es la espina dorsal de la trama y recorre el eje vertical central, el horizontal inferior y la parte céntrica del horizontal superior. Recorre las estaciones de metro de Peel y

McGill pertenecientes a una misma línea de metro (verde), y las estaciones Lucien-l'allier, Bonaventure, Plaza Victoria y la Plaza de Armas pertenecientes a la línea de metro paralela (naranja). Están conectadas mediante el gran eje vertical que concentra plazas y numerosas galerías comerciales.

- El segmento Berri-UQAM es el segundo eje vertical situado al norte de la primera. En ella se conectan varios edificios universitarios tales como pabellones y bibliotecas, así como, la estación de autobuses de Montreal.
- El segmento Guy-Concordia es el correspondiente a la zona oeste de la trama (continuación de la línea verde).
- El segmento Atwater es la zona más al norte, en donde coinciden las líneas verde y naranja de metro.

El RÉSO fue inicialmente proyectado para uso del sector privado; sin embargo, la ciudad de Montreal hizo un gran esfuerzo para la regularización urbanística del espacio con el fin de aprovechar los recursos y mejorar, así, la economía de la ciudad. Así pues, en la actualidad la ciudad subterránea de Montreal es un ejemplo de sostenibilidad y accesibilidad en el mundo tras sus inicios en 1962 hasta la actualidad.



Figura 58: Vista del interior 2

4. Comparativa de casos

En el presente apartado se hará una tabla resumen comparativa entre los tres casos de estudio detallados en el apartado anterior. En ella se establecerán las siguientes categorías:

4.1. Ubicación

En primer lugar, se sitúa la construcción geográficamente, determinando aspectos significativos como el tipo de clima, las temperaturas media, máxima y mínima, y el año de construcción de esta.

4.2. Dimensiones

La definición de las dimensiones se remitirá a la cota máxima construida, los metros cuadrados construidos, número de plantas y núcleos de comunicación vertical. En el caso de no disponer la información precisa para cada apartado, se hará una estimación en base a las siguientes condiciones.

- Se estima una altura libre de planta de cinco metros aproximadamente. En las construcciones subterráneas el techo se sitúa, generalmente, más alejado para evitar la sensación de agobio.
- Se asocia el número de núcleos de comunicación vertical al número de accesos que posee la edificación, pues se estudia la relación con el exterior.

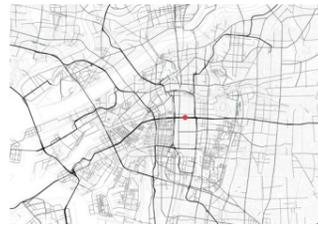
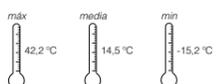
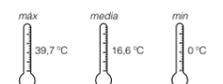
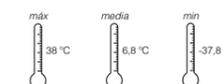
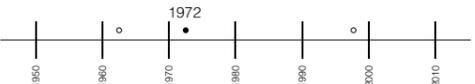
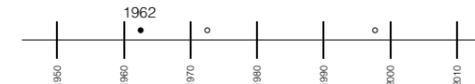
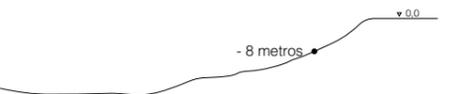
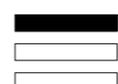
4.3. Construcción

En primer lugar, se define la razón de su construcción, es decir, el motivo que ha impulsado al propietario a realizar la construcción bajo tierra. Posteriormente, se define la excavación y construcción mediante el uso de maquinaria y materiales empleados. Por último, mencionar el tipo de ventilación e iluminación adoptados.

4.4. Uso

En este apartado se concretará, en primer lugar, el uso principal de la construcción. En el caso de tener más de uno, se nombrarán los demás y su distribución espacial, es decir, si están en cotas más próximas a la superficie, si tienen mayor iluminación, etc. Además, determinar si el espacio construido es de uso público o de uso privado.

4.5. Resumen de comparativa de datos

	RASCAINFIERNOS	CRYSTA NAGAHORI	CIUDAD SUBTERRÁNEA DE MONTREAL
Ubicación	Localización  Madrid, España / 40°30' N 3°40" O	 Osaka, Japón / 34°41'37" N 135°30'07" E	 Montreal, Quebec, Canadá / 45°30'32" N 73°33'42" O
	Tipo de clima y temperatura media Clima continental mediterráneo 	Clima subtropical húmedo 	Clima continental húmedo 
	Año de la construcción 		
Dimensiones	Cota máxima construida 		
	Metros cuadrados construidos 81 metros cuadrados	81.765 metros cuadrados	4.000.000.000 metros cuadrados (4 kilómetros cuadrados)
	Número de plantas  Dos plantas	 Una planta (más una inferior para el transporte ferroviario)	 Una, dos e incluso tres plantas, según la sección
	Número de accesos / núcleos de comunicación vertical Un acceso Dos núcleos de comunicación vertical 	36 accesos 36 núcleos de comunicación vertical 	63 accesos 63 núcleos de comunicación vertical 
Construcción	Razón de su construcción Motivos personales	Conexión subterránea peatonal entre estaciones de metro y liberar la congestión en las calles separando el tráfico rodado del peatonal	Refugio frente a temperaturas extremas Desarrollo mediante numerosos planes urbanísticos e inversión por parte del gobierno
	Exvacación y construcción Maquinaria sencilla: pico y pala	Maquinaria compleja (Se remite al apartado 2.3.3. del presente trabajo)	Maquinaria compleja (Se remite al apartado 2.3.3. del presente trabajo)
	Tipo de ventilación e iluminación Ventilación natural Iluminación mediante lucernarios en la zona del comedor y la entrada, acompañado de iluminación eléctrica	Ventilación mecánica, principalmente, mediante toberas y ventilación natural Iluminación natural mediante tragaluces, acompañado de iluminación eléctrica	Ventilación híbrida: mecánica y natural Iluminación natural mediante claraboyas, acompañado de iluminación eléctrica
	Ocupación y distribución de usos Vivienda unifamiliar	Comercio, transporte y ocio	Comercio, transporte, ocio, lucrativo, residencial, dotacional, administrativo y equipamientos
	Uso Público / privado	Privado	Público

5. Casos fallidos de arquitectura subterránea

De la misma forma que existen buenos casos de arquitectura subterránea, existen casos de arquitectura con un mal desarrollo o mala aceptación por parte de la población. Además, la posibilidad de abandono de la construcción, convirtiéndola en un espacio ruinoso y descuidado.

5.1. Ciudad subterránea de Pekín

La ciudad subterránea de Pekín, también conocida como la *Gran muralla subterránea*, es un refugio antiaéreo utilizado durante la Guerra Fría que se organizaba mediante un entramado de túneles bajo Pekín. Su construcción se realizó entre los años 1969 hasta 1979 para anticiparse a la guerra nuclear con la Unión Soviética, con el fin de servir como protección militar [Wang, 2015].



Figura 59: Túnel subterráneo en Pekín durante la Guerra Fría

La red de túneles recorre bajo las calles de Pekín, cubriendo un área de 85 kilómetros cuadrados con una profundidad de ocho hasta dieciocho metros. Existieron, aproximadamente, 90 entradas al complejo estando todas ocultas en el interior de los locales de la superficie; aunque muchas de estas entradas han sido demolidas o bloqueadas hoy en día [Patowary, 2018].

En el interior se construyeron cerca de 10.000 búnkeres para servir como apartamentos en caso de guerra. Sin embargo, cuando ya no existía esta amenaza, el departamento de defensa de Pekín decidió vender este terreno a propietarios o promotores que quisieran explotar las existencias para convertirlas en viviendas reguladas. Lejos de ser reguladas, estas viviendas sirven como alojamiento a personas que pocos recursos que huyen a la ciudad en busca de un futuro mejor. Las condiciones de habitabilidad eran bajas por iluminación, ventilación y espacio. Los visitantes que pudieron



Figura 60: Entrada a la ciudad subterránea



Figura 61: Vista interior. Sala de caligrafía

acceder a las instalaciones describieron el lugar como oscuro, húmedo e inquietante.

Ante la nula actuación de los propietarios, el gobierno de Pekín decidió cerrar este espacio en 2010 con poco éxito, pues los inquilinos no tienen otro lugar a donde ir dentro de la ciudad debido a los altos precios de las viviendas. La vida dentro de estos búnkeres es dura. Se trata de un espacio reformado con más usos que el residencial, pues también posee una sala de comedor, una sala de juegos, karaoke y una escuela de caligrafía [Ming, 2017].

5.2. Estación de Aldwich, Londres

Localizado en la ciudad de Londres, esta estación de metro fue cerrada debido al poco uso de esa estación por parte de los pasajeros. Se inauguró en 1907 en un barrio céntrico de Londres; sin embargo, llegó a cerrarse en varias ocasiones hasta su final definitivo en 1994 debido a pérdidas económicas por la falta de usuarios. En la actualidad, las vías del tren y los andenes están intactos a pesar de llevar cerrado casi 30 años [Catford, 1995].



Figura 62: Estación de Aldwich, Londres

5.3. Estación de Chamberí, Madrid

De forma parecida a la estación de Aldwich, la estación madrileña de Chamberí fue cerrada en 1966 debido a que la empresa de transportes decidió alargar la dimensión de los trenes debido al aumento de la población, dejando a la estación inservible por falta de espacio.

Durante la Guerra Civil, sirvió como refugio durante los bombardeos. En la actualidad se puede visitar pues fue restaurada entre 2006 y 2008, convirtiéndose en un museo [RÍOS, 2019].

5.4. Búnker del gobierno, Bonn, Alemania

El búnker del gobierno, cuyo nombre oficial era Espacio de emergencia de los órganos federales constitucionales en el caso de crisis para mantener su capacidad de funcionamiento, era un complejo subterráneo utilizado durante la Guerra Fría como refugio para el gobierno alemán, el parlamento y el personal federal. Fue construido durante los años 1960 y 1972 en el interior de dos túneles ferroviarios definidos como enclaves estratégicos. Debía ser capaz de almacenar a aproximadamente 3000 personas durante 30 días. No poseía instrumentos de defensa en su interior pero poseía un sistema autónomo de generación eléctrica, entrada de aire exterior y agua potable. La longitud de los túneles llegó a alcanzar los 19 kilómetros y su profundidad hasta los 110 metros.

En 1997, se tomó la decisión de abandonar el complejo subterráneo debido a que no se encontró un segundo uso para este. En 2001 se



Figura 63: Vista interior del búnker

detuvo su demolición debido a los ataques del 11 de septiembre, por lo que se mantuvo en caso de alarma o necesidad.

En marzo de 2008 se propuso la reapertura del búnker como museo. En la actualidad, los visitantes pueden acceder a distintas instalaciones del complejo que están reformadas [The Government Bunker, (s.f.)].



Figura 64: Vista desde la entrada

5.5. Ciudad subterránea de Seattle

La ciudad subterránea oculta los restos de la antigua Seattle, bajo las calles del barrio Pioneer. Existe una red subterránea de pasadizos, corredores y sótanos que pertenecieron a las primeras construcciones en la ciudad. Además, existen ruinas de locales, hoteles o viviendas que siguen en pie hoy en día.

A mediados del siglo XIX, estas construcciones estaban en la superficie, normalmente hechas de madera. Gran parte de ellas fueron arrasadas en el gran incendio de Seattle de 1889. Tras esto, se decidió que las futuras construcciones serían de ladrillo para prevenir este tipo de desastres y que las calles de la ciudad se elevarían 6,7 metros sobre las previas construcciones. Esta decisión colocó en una encrucijada a dueños de establecimientos no quemados dado que, si no accedían a desplazar su negocio, paulatinamente quedaría enterrado.

En 1907 se abandonó completamente este espacio con la llegada de la plaga bubónica, debido a las malas condiciones de higiene y salubridad, convirtiéndose en un lugar despoblado que acabó destinado a actividades ilegales.

En 1965, un reportero descubrió el lugar y propuso la conservación de las ruinas de Seattle, convirtiendo ese espacio en un museo con el consentimiento de sus propietarios. Con el paso de los años, se ha conseguido la renovación de la estructura existente, con un gran recibimiento por parte de visitantes y turistas. [Nanevski, 2017].



Figura 65: Vista interior de las ruinas de Seattle



Figura 66: Vista interior Seattle

6. Viabilidad en el futuro

Existen numerosos estudios que defienden la arquitectura subterránea como respuesta a futuros problemas relacionados con el crecimiento demográfico y el colapso de las grandes ciudades.

Según los datos de crecimiento de las Naciones Unidas, para el año 2050, la población urbana estará cerca de componer las dos terceras partes de la población mundial, estimándose en 6.300 millones de personas [McAlister, 2018]. Este crecimiento descontrolado y exponencial de la población somete a las ciudades a una gran densidad demográfica y uso masivo del suelo, ejerciendo una gran presión sobre la infraestructura existente.

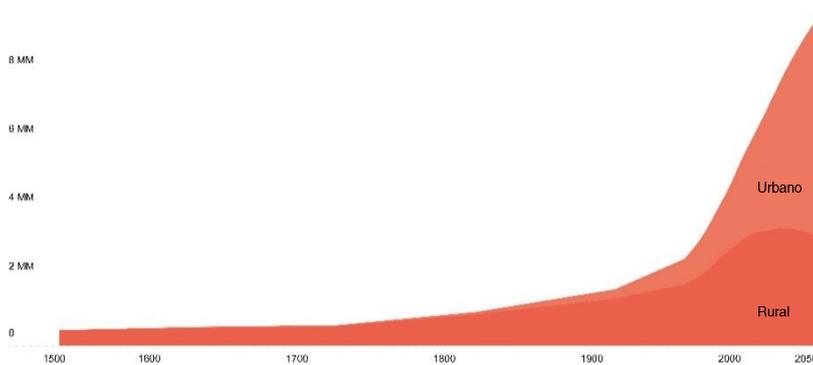


Figura 67: Población urbana y rural proyectada para el año 2050. Las proyecciones están basadas en las proyecciones de las Naciones Unidas.

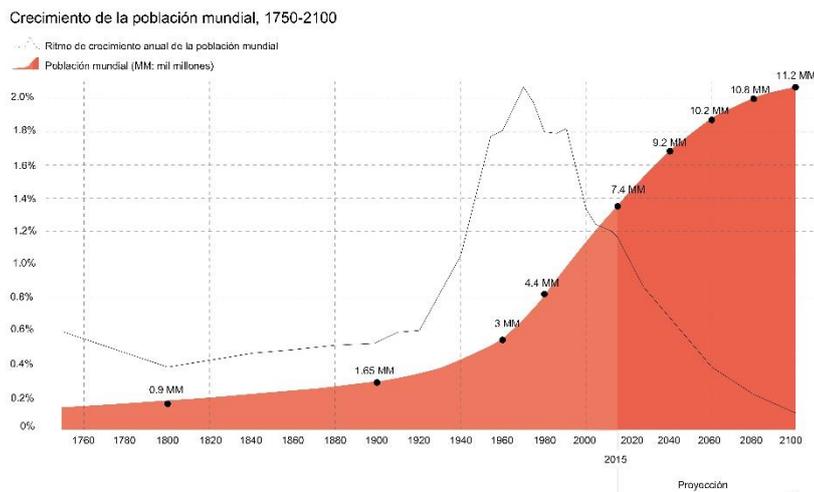


Figura 68: Crecimiento de la población mundial, proyectado para 2100.

Hoy en día, las grandes ciudades acumulan el 9% de la población mundial. El crecimiento es diferente según la zona del mundo, sin embargo, las grandes ciudades poseen un crecimiento demográfico más lento que la media. Por

ejemplo, Tokio continúa siendo a día de hoy la ciudad más poblada del mundo desde 1955 [Canal RakingTheWorld. (24 de septiembre de 2020)]. Estas grandes ciudades, llamadas *mega-ciudades*, no solo se definen así por su alto índice demográfico, sino también porque representan enclaves estratégicos en cuanto a política y economía.

Como se ha mencionado previamente, estas ciudades deben lidiar con los problemas derivados de un crecimiento que afecta de forma directa al modo de vida: se precisan de nuevas viviendas para el alojamiento de inmigrantes, aumento de la infraestructura para dar servicio a toda la población, aumento de espacios públicos, culturales, dotacionales y equipamientos. La sociedad debe prever todos estos cambios a la vez que se enfrenta a problemas globales como el cambio climático, el efecto invernadero, el efecto isla de calor, la contaminación o la generación de residuos. El desarrollo y uso del espacio subterráneo podría paliar estos problemas, dando soluciones satisfactorias relativas a futuras catástrofes. Para el diseño de ciudades sostenibles y resilientes, esta debe poder resistir desastres naturales u otras amenazas. La arquitectura subterránea puede utilizarse para proteger a la población de dichas amenazas tales como inundaciones, terremotos o temperaturas extremas.

Otros daños colaterales derivados de las *mega-ciudades* es la gran demanda de consumo energético. A lo largo de este trabajo se ha mencionado el ahorro energético que supone una construcción subterránea debido al calor interno del terreno y su menor exposición a la superficie [Kaliampakos, 2016]. Un estudio realizado sobre el diseño de una residencia enterrada la isla griega Kea en comparación con una residencia típica superficial determina que una vivienda subterránea precisa de más de un 40% menos de energía [Benardos, Athanasiadis, Katsoulakosc, 2014]. Esta comparativa se realizó en dos casos concretos de vivienda en una zona cuya temperatura máxima sobrepasa los 30°C, con gran exposición solar.

Mes	Bajo tierra		Superficie	
	Bajo tierra: Demanda de calefacción [kWh]	Bajo tierra: Demanda de refrigeración [kWh]	Superficial: Demanda de calefacción [kWh]	Superficial: Demanda de refrigeración [kWh]
Enero	323	0	691	0
Febrero	238	0	531	0
Marzo	110	0	347	0
Abril	0	116	41	191
Mayo	0	450	0	545
Junio	0	1050	0	1312
Julio	0	1333	0	1732
Agosto	0	1282	0	1643
Septiembre	0	843	0	973
Octubre	0	603	0	692
Noviembre	14	0	110	0
Diciembre	207	0	500	0
TOTAL	892	5677	2220	7088

Figura 69: Tabla comparativa de demanda energética entre una vivienda subterránea en la isla de Kea y una vivienda típica superficial. Estudio realizado por Benardos, Athanasiadis y Katsoulakosc.

Los resultados indicaban que la vivienda superficial demandaba hasta un 250% más de energía para calefacción y un 25% más de energía para refrigeración.

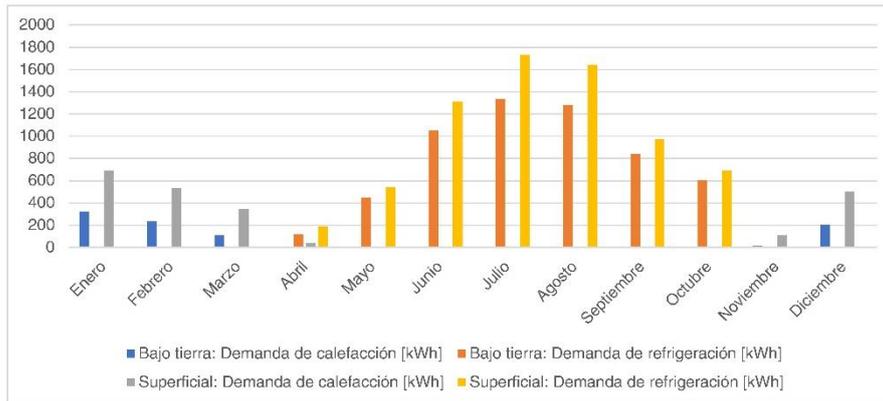


Figura 70: Diagrama de demanda energética entre una vivienda subterránea en la isla de Kea y una vivienda típica superficial. Estudio realizado por Benardos, Athanasiadis y Katsoulakos.

Estos resultados se obtienen de un estudio particular realizado en dos viviendas determinadas. Por supuesto, este porcentaje de ahorro dependería según las construcciones elegidas, su ubicación, clima, terreno, profundidad, materialidad, uso, y otros factores que se han ido mencionando a lo largo de este trabajo. Sin embargo, es inevitable asumir que el terreno posee grandes capacidades para el ahorro energético en mayor o menor medida. Este ahorro sería teórico, pues solo sería tangible una vez existiese la construcción, y nunca sería un porcentaje exacto pues es imposible recrear la misma construcción sobre rasante. [Kollarath, Madapur, Raina, 2019]

Por tanto, el desarrollo del espacio subterráneo puede ser una importante estrategia para la evolución de las zonas urbanas con el fin de dar respuesta al proceso de globalización y crecimiento de determinadas zonas del mundo, y a la solución de problemas asociados a la gran demanda energética, catástrofes naturales o el cambio climático.

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

La trayectoria de la arquitectura subterránea demuestra su adaptabilidad a las necesidades que exponen la sociedad y el ser humano desde el inicio de los tiempos. El desarrollo de este trabajo ha logrado una profundización en el tema y, con ello, se han alcanzado unas conclusiones:

1. Existe una gran importancia del entorno a la hora de proyectar arquitectura subterránea. Características relativas al clima, al terreno, la topografía, la materialidad, la profundidad o, incluso, la maquinaria son factores que determinan la forma de la construcción posterior. Durante el trabajo, se ha concluido que los climas secos o áridos son más convenientes para este tipo de construcciones, al igual que los suelos arenosos.
2. Las características del entorno no son el único factor para construir bajo tierra. Existen otras variables tales como el tipo de sociedad, demanda de suelo, coste de materiales y construcción, entre otros. La estrecha relación que existe entre la necesidad de espacio subterráneo y su construcción es mayor que la relación con las condiciones de entorno.
3. Las razones por las que en algunos lugares del mundo hay arquitectura subterránea y en otros no radica en estas variables. No es tanto la capacidad de construir arquitectura subterránea sino la necesidad. La necesidad inherente de cobijo que poseían todos los animales fue la principal motivación para buscar refugios tanto subterráneos como adosadas a un macizo vertical. En el caso de los seres humanos, esta necesidad de resguardarse bajo tierra fue evolucionando a la vez que las necesidades sociales de estos.
4. Estas construcciones son más comunes en lugares en donde ha habido guerras recientemente o cuyo clima sea con temperaturas muy extremas: Estados Unidos, China, Japón, Canadá, Singapur, Alemania... Por supuesto, no es la única razón dado que la arquitectura se relaciona con la sociología y la percepción de estos espacios por parte de los habitantes. Es inevitable que, para que existan estas construcciones, la población les dé uso.
5. Existe una gran variedad de usos desarrollados en la arquitectura subterránea: galerías comerciales, oficinas, centros educativos, bibliotecas, viviendas... Los espacios más próximos a la superficie son los que reciben luz natural directa y suelen albergar usos en donde el usuario va a estar un periodo largo de tiempo. Usos tales como almacenamiento, transporte o cuartos

técnicos suelen ubicarse en las plantas inferiores alejadas de la superficie pues su estancia es mucho más corta.

6. En la actualidad, la demanda de arquitectura subterránea responde a la falta de espacio superficial para la construcción, como ocurre en ciudades superpobladas. Sin embargo, aún existe una demanda de arquitectura subterránea por protección contra agentes externos tales como el frío o la guerra, como ocurre en Montreal o en Jerusalén.
7. Es cierto que la viabilidad en la construcción depende de la necesidad, sin embargo, esta no es una constante en el tiempo. Existen numerosos casos de arquitectura subterránea proyectada con un fin concreto (refugios de guerra, protección contra el frío, inversión comercial...) que, tras haber desarrollado su función, han quedado obsoletos por el avance de la sociedad. La arquitectura subterránea requiere de un gran mantenimiento por parte de los usuarios, pues un abandono de la construcción supone una mala ventilación del espacio interior provocando humedades, desperfectos en los materiales, aparición de roedores o plagas, entre otros.
8. Con el fin de evitar su obsolescencia, varias entidades han optado por dar a sus construcciones una segunda vida otorgando un nuevo uso al espacio.
9. El diseño está estrechamente ligado con el urbanismo, que debe regular su construcción mediante planes de ordenación como ocurre en el caso de Montreal. Una mala proyección subterránea puede derivar en abandono y deterioro de espacios interiores como se comentaba en el punto 5.
10. La existencia de espacios públicos subterráneos puede provocar que haya personas *viviendo* en ese espacio, pudiendo afectar a su utilización y seguridad. Por ello, se necesita una regulación de estos espacios para un correcto funcionamiento del mismo.
11. El material más utilizado en estas construcciones es el hormigón armado debido a su durabilidad, resistencia, inercia térmica y resistencia al fuego. Sin embargo, se debe vigilar su obtención y vertido, pues el acero que lo arma debe estar bien protegido frente a la humedad por la corrosión.
12. La iluminación interior se realiza eléctrica o naturalmente. La incidencia de luz natural suele realizarse mediante lucernarios, pero se debe controlar su incidencia para evitar deslumbramientos en el interior y el efecto invernadero por falta de ventilación.

13. El coste de estas construcciones es más elevado que el de una construcción superficial. Sin embargo, en una comparativa global, la arquitectura subterránea sí es competitiva debido a sus ventajas de aislamiento térmico y acústico, ofreciendo espacios confortables térmicamente y más silenciosos, aumentando la calidad de vida de los usuarios.
14. La arquitectura subterránea puede servir como solución frente a catástrofes naturales o efectos adversos derivados del efecto invernadero, la globalización y la emigración a las grandes ciudades. Es imperativo que los gobiernos del mundo establezcan soluciones que puedan paliar estos problemas. La arquitectura subterránea ha demostrado ser ventajosa en casos de heladas, temperaturas extremas, terremotos o inundaciones.

Como futuras líneas de investigación, sería interesante el estudio de los efectos que podría provocar una prolongada estancia en lugares subterráneos. Las consecuencias físicas y psicológicas asociadas a espacios cerrados, húmedos y oscuros. Con ello, reproducir unos estándares mínimos que deben cumplir estas construcciones para una viabilidad en el futuro. La regulación de estos espacios es imperativa para el correcto desarrollo y funcionamiento de estos.

Además, las patologías particulares surgidas de este tipo de arquitectura y su resolución. La exposición de los materiales al terreno es conocida, dado que la cimentación de los edificios es así. Sin embargo, la estancia de personas bajo tierra en una construcción cuya cimentación y cerramiento están bajo tierra es una realidad muy distinta. Debido a diferencias térmicas entre interior y exterior, la necesidad de instalaciones y el correcto sellado del aislamiento e impermeabilizante de toda la construcción, se debe estudiar cuáles serían los sistemas constructivos óptimos para este tipo de arquitectura.

La maquinaria existente puede ser un limitativo para el desarrollo de esta arquitectura, pues una construcción relativamente pequeña no puede ser ejecutada con maquinaria mecánica, sino con maquinaria tradicional como sería el pico y la pala. El desarrollo de nuevos instrumentos que puedan resolver los problemas constructivos a los que hoy en día se enfrenta la arquitectura subterránea podría impulsar su uso en el futuro.

8. Bibliografía

Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). *Valores climatológicos extremos en la zona de Madrid Aeropuerto*. URL <https://short.upm.es/nyakb>

Agencia Estatal de Meteorología. (s.f.). *Valores climatológicos normales en la zona de Madrid Aeropuerto*. Última actualización: 30 de abril 2021. URL <https://short.upm.es/c9oe9>

Agencia Meteorológica de Japón, (s.f.) *Temperatura media mensual y anual*. URL <https://short.upm.es/exunv>

BENARDOS, A., ATHANASIADIS, I., KATSOULAKOS, N. 2014. *Modern earth sheltered constructions: A paradigm of green engineering*. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 41, Marzo 2014, pp. 46-52. URL <https://short.upm.es/tveb1> Traducción realizada por la autora.

Canal Osaka BlackCat. (12 de enero de 2021). *Osaka Walk - Crysta Nagahori DJI Pocket 2 4K Japón*. [Archivo de vídeo]. Youtube. URL <https://short.upm.es/6j1vq>

Canal RankingTheWorld. (24 de septiembre de 2020). *Top 15 Most Populated Cities In The World (1700-2019)*. [Archivo de vídeo]. Youtube. URL <https://short.upm.es/y6d21>

Climate-data (s.f.). *Clima, climograma, tabla climática de Montreal*. URL <https://short.upm.es/edxev>

CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures*. New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Traducción realizada por la autora.

CATFORD, N. 1995. *Aldwych Holborn Branch Line*. Revista digital Subterránea Britannica. [Revista inglesa sobre lugares subterráneos] Redactado: Agosto 1995. URL <https://short.upm.es/t3ce2>

Centro comercial Crysta Nagahori, (s.f.). Recuperado el 30 de mayo de 2021. URL <https://short.upm.es/xha3q> Traducción realizada por la autora.

Construmática. 2003. *Excavaciones en tierras*. Septiembre 2003. URL <https://short.upm.es/xco6>

DIB, C. 2017. *Conoce la historia de 'El Rascainfernos', la casa/cueva del arquitecto Fernando Higueras*. Revista digital Plataforma Arquitectura. Redactado: Agosto 2017. URL <https://short.upm.es/ph3yl>

EL-GENEIDY, A., KASTELBERGER, L., ABDELHAMID, H. T. (2011). *Montréal's Roots: Exploring the Growth of Montréal's Indoor City*. Revista sobre transporte y explotación del suelo, VOL. 4 N°2. URL <https://short.upm.es/hhtjv> Traducción realizada por la autora.

FRANCO, J.T., 2012. *Casa en Sierra Norte de Sevilla / Felipe Palomino*. Revista digital Plataforma Arquitectura. Redactado: Mayo 2012. Consultado: Abril 2021. URL <https://short.upm.es/5oz5q>

GARCÍA GÓMEZ, M. 2018. *Energía geotérmica ¿Qué es?*. Revista digital Energyavm. Mayo 2018. URL <https://short.upm.es/h65e9>

GOLANY, G., 1992. *Chinese earth-sheltered dwellings: indigenous lessons for modern urban design*. Honolulu: University of Hawaii Press. 178 páginas. ISBN 0-8248-1369-3. Traducción realizada por la autora.

HIGUERAS, F. (s.f.) *Fernando Higuera > Rasca infernos*. Revista digital HIC Arquitectura. URL <https://short.upm.es/jotyv>

HOLTHUSEN, T.L., 1981. *The potential of earth-sheltered and underground space: today's resource for tomorrow's space and energy viability*. New York: Pergamon Press, 127 páginas. ISBN 0-08-028050-1. Traducción realizada por la autora.

Hospital subterráneo Hohlgangsanlage 8, (s.f.). Recuperado el 29 de mayo de 2021. URL <https://short.upm.es/trjs3> Traducción realizada por la autora.

Instituto geológico y minero de España. (s.f.). *Atlas geocientífico de Madrid: Mapa de minerales y rocas industriales a escala 1:400.000 de Madrid*. URL <https://short.upm.es/l2n71>

KALIAMPAKOS, D. 2016. *Underground Development: A Springboard to Make City life Better in the 21st Century*. Revista Procedia Engineering, Vol. 165 pp. 205-2013. Disponible online: Diciembre 2016. URL <https://short.upm.es/1fuln> Traducción realizada por la autora.

KOLLARATH, R., MADAPUR, B., RAINA, S. 2019. *Underground Cities: Sustainable Urbanism of the future*. Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication. Vol. 8 pp. 1754-1757. ISSN: 2277-3878. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). Agosto 2019. URL <https://short.upm.es/f6spu> Traducción realizada por la autora.

LOUBES, J.P., 1985. *Arquitectura subterránea: aproximación a un hábitat natural*. Barcelona: Gustavo Gili. 503 páginas. ISBN 84-252-1231-6.

MARTÍN ARRIBAS, L. 2014. *Geotermina. Energía desde el corazón de la tierra*. Revista digital Compromiso Empresarial, volumen RSC. Abril 2014. URL <https://short.upm.es/8naz8>

MCALISTER, D. 2018. *Taking Urban Development Underground: Future-ready solutions for ensuring urban sustainability*. WSP Enterprise. Noviembre, 2018. URL <https://short.upm.es/svbwk> Traducción realizada por la autora.

MING, Y. 2017. *A Million People Live in These Underground Nuclear Bunkers: Beneath the streets of Beijing, people live in an underground universe constructed during the Cold War era*. Revista National

Geographic. URL <https://short.upm.es/uugtk> Traducción realizada por la autora.

Naciones Unidas, (s.f.). *Desafíos globales: población*. URL <https://short.upm.es/x3ofy>

NANEVSKI, D. 2017. *Seattle Underground: The remains of the old city that were abandoned and left in ruins until the 1950s*. Blog: Abandoned Spaces. URL <https://short.upm.es/ew9dx> Traducción realizada por la autora.

NEILA GONZÁLEZ, F.J., 2000. *La arquitectura subterránea*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. 33 páginas. ISBN 84-95365-22-7.

PATOWARY, K. 2018. *Beijing's underground city*. Revista digital Amusing planet. [Revista sobre historia, cultura y arte]. Redactado: Noviembre 2018. URL <https://short.upm.es/otc84> Traducción realizada por la autora.

PIESING, M. 2019. *El pozo superprofundo de Kola*. Revista digital BBC News. Agosto 2019. URL <https://short.upm.es/phfwx>

PINTADO LLURBA, X., 2018. *Construir para la eternidad: Finlandia, bajo la superficie = Kestävää rakentaminen: maanalainen Suomi*. Madrid: Fundación ESTEYCO. 257 páginas. ISBN 987-84-943324-9-4.

RAVENSROFT, T. 2017. *The world's deepest buildings*. Revista digital The B1M; Agosto 2017. URL <https://short.upm.es/vedpv>. Traducción realizada por la autora.

Revista digital Atrio Milano. *Crysta Nagahori, Osaka, Japan*. [página dedicada a urbanismo: Masterplanning subterráneo.] URL <https://short.upm.es/43f30>

Revista digital Atrio Milano. *Montréal downtown underground complex*. [página dedicada a urbanismo: Masterplanning subterráneo.] URL <https://short.upm.es/ctoxz>

RÍOS, S. 2019. *La última apertura de la estación de Chamberí*. Periódico Madridiario. Mayo 2019. URL <https://short.upm.es/tsnmx>

RODRÍGUEZ, A. 2019. 'Rascainfiernos', la ejemplar vivienda enterrada de Fernando Higuera. Revista digital Plataforma Arquitectura. Redactado: Agosto 2019. URL <https://short.upm.es/xwz3a>

SANCHO ROSELL, DANIEL, 2017. *Los refugios antiaéreos de la Guerra Civil Española en Valencia: el caso del refugio de Serranos* / Palomino. S.l.: Universitat Politècnica de València.

SARACHU, E. 2019. *El radón en los edificios; normativa, ámbito de aplicación y soluciones*. Revista digital E-ficiencia. Agosto 2019. URL <https://short.upm.es/jiwzr>

SOLOMAN, A., FRAMPTON, C., WONG, J., 2012. *Cities without Ground: A Hong Kong Guidebook*. Reino Unido: Oro Editions; N.º 1 edición (1

mayo 2012). 128 páginas. ISBN-13: 978-1935935322. Traducción realizada por la autora.

The Government Bunker, (s.f.). Recuperado el 29 de mayo de 2021. URL <https://short.upm.es/3s2n9> Traducción realizada por la autora.

UNIVERSIDAD DE MINESOTA CENTRO DE ESPACIOS SUBTERRÁNEOS, 1983. *Conjuntos de viviendas semienterradas: comportamiento energético y aspectos urbanísticos*. México: Gustavo Gili. 255 páginas. ISBN 968-6085-70-X.

UNIVERSIDAD DE MINESOTA CENTRO DE ESPACIOS SUBTERRÁNEOS, 1980. *Tierra y cobijo: diseño de casas semienterradas*. Barcelona: Gustavo Gili. 288 páginas.

UNIVERSIDAD DE MINESOTA CENTRO DE ESPACIOS SUBTERRÁNEOS, 1982. *Viviendas unifamiliares semienterradas: proyectos y dibujos*. Barcelona: Gustavo Gili. 127 páginas. ISBN 84-252-1117-4.

VILLAR NAVASCUÉS, R. 2016. Universidad de alicante. *Las viviendas subterráneas y el riesgo sísmico*. Revista digital Geographos. Alicante. Vol. 7. Nº 88. URL <https://short.upm.es/hvme>

WAMPLER, L., 2008. *Underground homes*. Rev. ed. Gretna: Pelican. 121 páginas. ISBN 978-0-88289-273-3. Traducción realizada por la autora.

WANG, Z. 2015. *Beijing's underground city*. Redactado: Abril 2015. URL <https://short.upm.es/i6p06> Traducción realizada por la autora.

WILLIAMS, C. 1997. *Efficient Earth-Sheltered Homes*. Revista digital Energy Saver (EEUU); Febrero 1997. URL <https://short.upm.es/afvdg>. Traducción realizada por la autora.

World Population Review (s.f.) *Aumento de la población en Osaka*. Recuperado el 26 de mayo de 2021. URL <https://short.upm.es/5tpm8> Traducción realizada por la autora.

ZACHARIAS, J. 2001. *Pedestrian behavior and perception in urban walking environments*. Journal of Planning Literature, VOL. 16 Nº1. URL <https://short.upm.es/919sz> Traducción realizada por la autora.

9. Índice de figuras

- Figura 1: Casa Plan B, Sergey Makhno Architects
<https://short.upm.es/fbb2m>
- Figura 2: Rainier Square Tower, Seattle <https://short.upm.es/1y9ft>
- Figura 3: Restaurante 5.8 UNDERSEA, Islas Maldivas
<https://short.upm.es/lt5tc>
- Figura 4: Construcción subterránea MTR en Singapur
<https://short.upm.es/8fjd2>
- Figura 5: Mapa de localizaciones de los ámbitos de estudio.
Elaboración propia
- Figura 6: Gruta de Son Doòng, Vietnam <https://short.upm.es/tzeyy>
- Figura 7: Representación de cuevas. Elaboración propia
- Figura 8: Museo Kimbell, L. Kahn <https://short.upm.es/duphh>
- Figura 9: Galerías comerciales en Japón <https://short.upm.es/gwzki>
- Figura 10: Tipología de arquitectura subterránea horizontal.
Nombres de arriba abajo y de izquierda a derecha: Cueva simple, cueva con cámaras, cueva escalonada en ladera, cueva horadada, cueva en repisa. Elaboración propia.
- Figura 11: Tipología de arquitectura subterránea vertical. Nombres de izquierda a derecha: Cueva recta, cueva en saco. Elaboración propia.
- Figura 12: Tipología de arquitectura subterránea mixta. Nombres de arriba a abajo: Cueva de doble acceso, cueva desde patio, cueva desde rampa. Elaboración propia.
- Figura 13: Mapa del mundo con zonas secas o áridas señaladas.
Elaboración propia basado en la clasificación climática de Köppen.
- Figura 14: Pozo súperprofundo de Kola, Rusia
<https://short.upm.es/864ip>
- Figura 15: Máquina bulldozer <https://short.upm.es/fao68>
- Figura 16: Máquina traílla <https://short.upm.es/83myv>
- Figura 17: Suelo granular <https://short.upm.es/3u0pf>
- Figura 18: Mapa de municipios en España potencialmente afectados por el gas Radón, siendo la zona rosa la de mayor gravedad, seguido

de la azul de gravedad intermedia y la zona gris que no presenta riesgo <https://short.upm.es/0epoi>

- Figura 19: Descripción gráfica de cimentación compensada.
Elaboración propia
- Figura 20: Planta de producción de energía geotérmica
<https://short.upm.es/ie5m7>
- Figura 21: Derinkuyu, Turquía <https://short.upm.es/s54i9>
- Figura 22: Vista interior Derinkuyu, Turquía
<https://short.upm.es/fk76m>
- Figura 23: Proyecto Tsin Sha, Hong Kong
<https://short.upm.es/v049x>
- Figura 24: Casa en Sierra Norte de Sevilla, Felipe Palomino
<https://short.upm.es/bp19a>
- Figura 25: Hospital subterráneo en Bailía de Jersey, Reino Unido.
<https://short.upm.es/5mlkf>
- Figura 26: Colegio Wildwood en Aspen (Colorado, EEUU), David F. Gibson Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983.
Underground building design : comercial and institutional structures. New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 76.
- Figura 27: Sección del Colegio Wildwood Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures.* New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 76.
- Figura 28: Biblioteca municipal Walker en Minneapolis (Minnesota, EEUU), BRW Architects Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures.* New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 94.
- Figura 29: Sección de la Biblioteca municipal Walker Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures.* New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 94.
- Figura 30: Ampliación de la Sede Mutual of Omaha en Omaha (Nebraska, EEUU), Leo A. Daly Company Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and*

- institutional structures*. New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 148.
- Figura 31: Sección de la Ampliación de la Sede Mutuals of Omaha (Nebraska, EEUU) Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures*. New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 148.
 - Figura 32: Colegio Terraset, Fairfax County (Virginia, EEUU) Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures*. New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 108.
 - Figura 33: Sección Colegio Terraset, Fairfax County (Virginia, EEUU) Procedencia: CARMODY, J. y STERLING, R., 1983. *Underground building design : comercial and institutional structures*. New York: Van Nostrand Reinhold; 254 páginas. ISBN 0-442-28686-4. Página 108.
 - Figura 34: Casa Rascaifiernos, Fernando Higuera <https://short.upm.es/w1gaf>
 - Figura 35: Galerías subterráneas Crysta Nagahori <https://short.upm.es/bo2ps>
 - Figura 36: Ciudad subterránea de Montreal <https://short.upm.es/2v70g>
 - Figura 37: Mapa de minerales y rocas industriales de Madrid - Atlas geocientífico de Madrid <https://short.upm.es/l2n71>
 - Figura 38: Vista desde la superficie <https://short.upm.es/w1gaf>
 - Figura 39: Sección de El Rascaifiernos <https://short.upm.es/6jvnp>
 - Figura 40: Vista entre el estudio y el salón <https://short.upm.es/6jvnp>
 - Figura 41: Vista desde el salón <https://short.upm.es/6jvnp>
 - Figura 42: Vista bajo el lucernario <https://short.upm.es/6jvnp>
 - Figura 43: Plantas y sección transversal de El Rascaifiernos <https://short.upm.es/6jvnp>
 - Figura 44: Vista desde la entrada <https://short.upm.es/6jvnp>
 - Figura 45: Axonometría de El Rascaifiernos <https://short.upm.es/w1gaf>

- Figura 46: Mapa de Osaka, Japón <https://short.upm.es/bo2ps>
- Figura 47: Vista interior <https://short.upm.es/1hw44>
- Figura 48: Entrada desde la estación Shinsaibashi
<https://short.upm.es/1hw44>
- Figura 49: Organización en planta de las galerías Crysta Nagahori
<https://short.upm.es/bo2ps>
- Figura 50: Vista interior de la iluminación cenital
<https://short.upm.es/1hw44>
- Figura 51: Iluminación y ventilación en el interior
<https://short.upm.es/1hw44>
- Figura 52: Vista aérea de Montreal <https://short.upm.es/of3ui>
- Figura 53: Organización urbanística de Montreal
<https://short.upm.es/of3ui>
- Figura 54: Entradas y estaciones de la ciudad subterránea de Montreal <https://short.upm.es/of3ui>
- Figura 55: Vista del interior 1 <https://short.upm.es/of3ui>
- Figura 56: Vista desde una de las entradas
<https://short.upm.es/of3ui>
- Figura 57: Evolución urbanística del RÉSO
<https://short.upm.es/hhtjv>
- Figura 58: Vista del interior 2 <https://short.upm.es/hhtjv>
- Figura 59: Túnel subterráneo en Pekín durante la Guerra Fría
<https://short.upm.es/gm9ft>
- Figura 60: Entrada a la ciudad subterránea
<https://short.upm.es/4arhv>
- Figura 61: Vista interior. Sala de caligrafía
<https://short.upm.es/erkps>
- Figura 62: Estación de Aldwich, Londres <https://short.upm.es/61zy3>
- Figura 63: Vista interior del búnker <https://short.upm.es/ljxdv>
- Figura 64: Vista desde la entrada <https://short.upm.es/bbwi7>
- Figura 65: Vista interior de las ruinas de Seattle
<https://short.upm.es/ipej2>
- Figura 66: Vista interior Seattle <https://short.upm.es/ipej2>
- Figura 67: Población urbana y rural proyectada para el año 2050. Las proyecciones están basadas en las proyecciones de las Naciones Unidas. <https://short.upm.es/ak7ao>

- Figura 68: Crecimiento de la población mundial, proyectado para 2100. <https://short.upm.es/539rq>
- Figura 69: Tabla comparativa de demanda energética entre una vivienda subterránea en la isla de Kea y una vivienda típica superficial. Estudio realizado por Benardos, Athanasiadis y Katsuolakosc. <https://short.upm.es/539rq>
- Figura 70: Diagrama de demanda energética entre una vivienda subterránea en la isla de Kea y una vivienda típica superficial. Estudio realizado por Benardos, Athanasiadis y Katsuolakosc. <https://short.upm.es/539rq>